Environment Canada
Environnement Canada

Canada

89-03274/

CLIMATE CHANGE DIGEST

CCD 87-01 Canadian Climate Impacts Program

CCD 87-02 Implications of Climatic Change for Agriculture in Ontario

CCD 87-03 Implications of Climatic Change for Navigation and Power Generation in the Great Lakes

Environment Canada Environnement Canada

IMPLICATIONS OF CLIMATIC CHANGE FOR NAVIGATION AND POWER GENERATION IN THE GREAT LAKES

Summary of Great Lakes Institute Reports

Phase I - Socio-Economic Assessment of the Implications of Climatic Change for Future Water Resources in the Great Lakes/St. Lawrence River System
(Report submitted March, 1985)

Phase II- Socio-Economic Assessment of the Implications of Climatic Change for Commercial Navigation and Hydro-Electric Power Generation in the Great Lakes - St. Lawrence River System
(Report submitted March, 1986)

Prepared for
Climate Change Digest
Atmospheric Environment Service

by
Marie Sanderson
Great Lakes Institute
University of Windsor
Windsor, Ontario

September 1987

DISCLAIMER

This publication contains a summary of the results of two studies prepared under contract, by the Great Lakes Institute, University of Windsor, to the Canadian Climate Centre. The views and opinions expressed herein are those of the authors and do not necessarily state or reflect those of the Government of Canada or any agency thereof.

Single copies of this publication may be obtained, free of charge, by writing to the:

Climate Program Office
Canadian Climate Centre
4905 Dufferin Street
Downsview, Ontario
M3H 5T4

Copies of the complete reports may be purchased by writing to:

The Great Lakes Institute
University of Windsor
Windsor, Ontario
N9B 3P4

Published by Authority of the
Minister of the Environment

© Minister of Supply and Services
Canada 1987

Catalogue No. EN57-27/1987-03
ISBN 0-662-55490-6
ISSN 0835-3980

FOREWORD

The composition of the earth's atmosphere is undergoing a major global change. Human activities, such as deforestation, the burning of fossil fuels and even agricultural practices have significantly increased the amount of carbon dioxide and other "greenhouse gases" in the atmosphere. There is now growing scientific evidence that increasing concentrations of these gases could result, over the next few decades, in a rise of global mean temperature which is greater than any in man's history (Villach Conference, Austria, October 1985). Studies indicate that warming in the range of 1.5 - 4.5°C could be expected; in Arctic regions it is likely to be even greater.

In the past few years, there has been an escalating international awareness of the dependence of various economic sectors on climatic fluctuations and on the implications of long-term climate change. Concerns have been expressed for the potential loss of coastal areas due to anticipated global sea level rises, destruction of the habitats of innumerable plant and animal species, and disruption of world agriculture, to name a few. At the same time, climate change offers the potential for significant economic opportunity. For Canada, this is likely to include an extension of the growing season and year-round shipping on the Great Lakes. The key element in successfully adapting to these changes will be our ability to mitigate the negative effects and to take advantage of the benefits.

In recognition of the impact of climate and climatic fluctuations on society, Canada established a Canadian Climate Program (CCP) in 1978 to integrate the efforts of various federal and provincial agencies as well as the universities and the private sector in the field of climatology. The Atmospheric Environment Service (AES) of Environment Canada was given responsibility as the lead agency for the program. One of the program's components has, since 1984, focussed on research studies to assess and identify the potential social and economic impacts of climate warming expected under a doubled carbon dioxide scenario. Most of these studies have been conducted under contract by Canadian universities.

While these and other studies over the last several years have clearly shown that increasing "greenhouse gas" concentrations have the potential for profound impacts on our physical environment, the results must still be treated as preliminary. There is general scientific agreement on the direction of long-term climate change, but uncertainty in the estimates of the magnitude and timing.

It is evident that additional studies are required in order to provide planning and policy information to all levels of government and private sector users. These would further serve to identify potential mitigative and adaptive strategies and be in keeping with Environment Canada's theme of "anticipate and prevent".

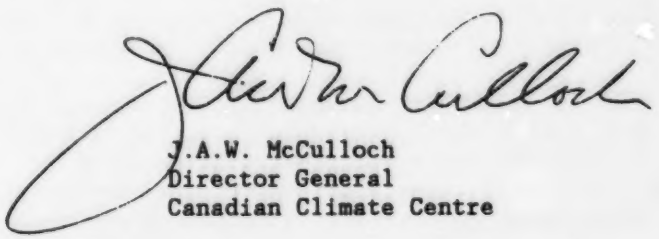
G. A. Sainte-Marie
Deputy Minister
Environment Canada

PREFACE

The Canadian Climate Centre (CCC) has funded a number of studies to investigate the potential impacts, on various sectors of the Canadian economy, of climate warming expected because of the increasing concentrations in the atmosphere of the "greenhouse gases". The equivalent of a doubling of the amount of CO_2 was the situated selected.

The projections of future climatic variables under this 2 x CO_2 scenario were adapted from two U.S. General Circulation Models - one developed by the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) and the other by the Goddard Institute for Space Studies (GISS). Researchers used these computer model predictions, or other derived variables, as inputs to various socio-economic models. Using these tools, and analyses of historical climate anomalies and their effects, investigators identify some of the first-order impacts of increased CO_2 and climate change.

The first issue of the Climate Change Digest identified the major socio-economic impact studies undertaken since 1984. A list of earlier titles in the series appears on the inside front cover. This third issue presents the summary results of two phases of a study to determine the likely impact of climate change on navigation and hydro power generation in the Great Lakes. Material in subsequent issues will include other study summaries as well as some articles relevant to other climate change issues.



J.A.W. McCulloch
Director General
Canadian Climate Centre

IMPLICATIONS OF CLIMATIC CHANGE FOR NAVIGATION AND POWER GENERATION IN THE GREAT LAKES

1 STUDY HIGHLIGHTS

Using a specific climate change scenario (GISS, 1984) and hydrologic and economic models, the present study concluded the following with respect to navigation and power generation in the Great Lakes under a $2xCO_2$ climate:

- Mean Great Lakes levels may be reduced 30 - 80 cms and mean flows in the connecting channels may be reduced by up to 20%.

- If climatic change and increased consumptive use of Great Lakes water occur, the frequency of low levels (as in the 1930's and 1960's) would occur in 8 years out of 10.

- Maximum ice cover on the Lakes may decline from 72% to 0% for Lake Superior, 38% to 0% for Michigan, 65% to 0% for Huron, 90% to 50% for Erie and 33% to 0% for Ontario, permitting an 11 month ice-free shipping season.

- Average annual costs to Canadian Great Lakes shipping companies for the four principal cargoes, iron ore, grain, coal and limestone, may increase approximately 30%

- The frequency of years when shipping costs equal or exceed those of the period of low lake levels of 1963-65 may occur in 9 years in 10.

- For the Canadian hydro generating stations on the Great Lakes climatic change plus increased consumptive use could result in a loss of 4165 gigawatt hours of power generation. Replacing the lost production with a mix of nuclear and fossil fuel generation could cost Ontario Hydro $65 M ($US 1979) annually. Converting these costs to 1984 Canadian dollars gives $111 M.

- Warmer temperatures will result in a lower demand for energy in winter and a slight increase in summer, resulting in an average annual saving of $172-204 M ($C 1984) for Ontario Hydro. Combining reduction in demand with reduction in generation will result in annual savings of $61-92 M. ($C 1984).

INTRODUCTION

World climatologists believe that the increasing concentration of CO_2 in the earth's atmosphere will result in significant changes in the world's climate during the next century. The effect of this climate change on future levels and flows in the Great Lakes and the consequent implications for navigation and power generation is a problem that must be addressed. Scientists usually assume that the future of a large hydrologic system like the Great Lakes will resemble the past, since lake levels and flows have been measured for some 100 years and no significant trends in levels and flows have been observed. However, this will not be the case if a change in climate occurs, and it is important that shipping and hydro power industries realize the implications to their operations of such climatic change.

This issue of Climate Change Digest summarizes research carried out by the Great Lakes Institute of the University of Windsor. The first phase of the research, completed in March 1985, included a review of the climate impacts literature, the construction of a theoretical framework describing the links through which climatic change would affect navigation and hydroelectric power generation in the Great Lakes, and an evaluation of several models for their suitability for climate impact assessment. The second phase of the research, completed in March 1986, was a preliminary assessment, using the appropriate models, of the impact of climatic change on navigation and hydro power generation in the Great Lakes. The following report combines the results of both phases of the research.

The Canadian Climate Centre of Environment Canada provided to the researchers a projection of climate conditions in the Great lakes Basin with an atmospheric CO_2 concentration twice that of pre-industrial times ($2xCO_2$). The data on monthly temperature and precipitation represented the modified output of the Goddard Institute of Space Studies' General Circulation Climate Model (GISS). The average annual warming in the Great Lakes basin projected by this model is approximately 4.5°C, slightly more in winter and less in summer. Annual precipitation is projected to increase approximately 8% for points in the central and western basin, but to decrease by 3-6% in the eastern basin. There are, of course, many assumptions and uncertainties in such large scale models and the outputs are very tentative estimates of future climate for any specific area. An additional problem in applying the output of the model to the Great Lakes basin is the fact that there are only 10 data points in or near the basin (Figure 1).

Figures 2 to 5 show the present and projected climatic conditions in the Great Lakes basin. Monthly data for the 10 points were obtained from the Atmospheric Environment Service, showing current means, specified change under the GISS scenario, and projected $2xCO_2$ values. Figure 2A shows average January isotherms for the period 1951-80 as measured by the Atmospheric

Environment Canada. It is seen that the isotherms parallel the lines of latitude and temperature decrease fairly uniformly from -5 in the south of the basin to -20C in the north. Under the GISS secnario (2B), January temperatures are projected to be 0°C in the south basin, and -10 to -15°C north of Lake Superior. For a substantial part of the basin, average January temperatures are projected to be above 0°C. Figure 3 shows the temperatures for July, the hottest month of the year; 3A the present normals and 3B the GISS scenario isotherms. At present, mean temperatures are rather uniform throughout the basin, from 21°C in the south to 15°C in the north. Under the GISS $2xCO_2$ climate (3B), average July temperature in the basin will rise to approximately 25°C.

Present precipitation patterns for January (Figure 4A) show annual amounts of 70 mm in the eastern to 40 mm in the western part of the basin. Under the GISS $2xCO_2$ conditions, greater precipitation is predicted around Lake Ontario as well as a westward shift in the isolines. Figure 5 shows the precipitation maps for September, (the month with the largest change under the scenario) from a rather uniform 90mm/month for present conditions (5A) to less uniformity in the future, 80 mm in the southeast to 100 mm in the northwest (5B). As far as total annual precipitation is concerned, the scenario indicates a precipitation decreases of 6% in the southeastern part of the basin, changing to an 18% increase in the northwestern basin.

GREAT LAKES HYDROLOGY UNDER $2xCO_2$ CLIMATE SCENARIO

Our researches were provided with three sets of data from a Great Lakes hydrologic model from the Inland Waters Directorate, Environment Canada. The years 1900-1976 were used as the basis-of-comparison period (BOC). The first set of data (Scenario A, Table 1) shows average annual lake levels and flows in the connecting channels which would have occurred during the period 1900-1976 under current diversions, regulation practices and physical conditions of the lakes and connecting channels (diversions include 142 m^3 sec^{-1} into Lake Superior via Long Lac and the Ogoki River, 91 m^3 sec^{-1} out of Lake Michigan at Chicago and 198 m^3 sec^{-1} from Lake Ontario through the Welland Canal). The regulations practices are Plan 77 for Lake Superior and 1958-D for Lake Ontario. Thus, with these assumptions, variability seen under BOC conditions is due to changes in climate only. During the BOC period, the variability of average annual levels ranged from 0.99 m for Lake Superior to 2.14 m for Lake Ontario. The average outflow ranges from 2204 m sec^{-1} for the St. Mary's River (Lake Superior) to 6856 m^3 sec^{-1} for the St. Lawrence River (Lake Ontario).

A second set of data (B) gives the levels and flows (for the period 1900 - 1976) which would occur under the GISS $2xCO_2$ climate scenario. The average level of Lake Superior decrease by 20 cm, Michigan - Huron 60 cm, Erie 44 cm and Ontario by 85 cm and mean flows decrease by 12-14% in the connecting channels. It was found that if the current regulation plan for Lake Ontario was strictly applied with the GISS $2xCO_2$ climate, levels and flows would drop dramatically during periods of low water levels as in the

1930's and 1960's (note range of 5.8m). Realistically, of course, such changes in level would not be allowed to occur by the Lake Ontario Levels Regulations Board and current regulations practices would be altered to maintain higher levels. For this reason, Lake Ontario was omitted from further analysis under this scenario.

A third set of data (C) shows lake level and flow data for a $2xCO_2$ climate plus the impact of increased consumptive use of Great Lakes water projected by the International Joint Commission in 1981 for the year 2035. In this scenario, average lake levels decreased by an additional 10 - 20 cms, the mean flow in the Detroit and Niagara rivers decreases by 3 - 6%.

As an example of the output of the three scenarios, the graph (Figure 6) shows the levels that would have occurred on Lake Erie for the period 1900-76. Table 2 shows the frequency of occurrence of extreme low levels as in the 1930's and 1960's) that would be experienced under this $2xCO_2$ climate scenario and increased consumptive use. In more than 75% of years, Lakes Superior, Michigan - Huron and Erie would experience such low levels. Because of the problem with the Lake Ontario model output, it was omitted from this analysis.

ICE COVER UNDER $2xCO_2$ CLIMATE

Our research into ice cover on the Great Lakes under this $2xCO_2$ climate scenario, indicated that average maximum ice cover on Lake Superior would decline from 72% to 0% of surface area, Michigan 38% to 0%, Huron 65% to 0%, Erie 90% to 50% and Ontario 33% to 0%. More analysis is required to yield a better estimate of ice cover duration, but our study indicates that under the GISS $2xCO_2$ climate scenario, ice conditions may be a problem for less than one month in most years.

The relevant input parameter for our navigation model, in order to determine the monthly distribution of transported cargo, is the length of the shipping season. Since ice may be a problem for less than one month, an 11-month shipping season rather than the present 8.5 month season, was utilized in the model.

With respect to the effect of ice on hydro-electric power generation, the major areas of concern are the Niagara and St. Lawrence Rivers. At present, an ice boom is placed near the head of the Niagara River to reduce the probability of ice blockages that reduce flow to the hydro power plant intakes. The expected reduction in Lake Erie ice cover under this $2xCO_2$ climate scenario would reduce the adverse affects of ice and shorten the duration ofice impacts on hydro production. In the St. Lawrence River, the operational practice is to form a stable ice cover. With warmer temperatures there will be fewer years during which ice cover forms, but there may also be an increase in the frequency of years during which ice is present but a stable cover cannot be formed. For this reason a $2XCO_2$ climate may necessitate changes in the operating practices at the St. Lawrence stations. Investigation of these relationships are beyond the scope of this paper.

IMPLICATIONS FOR NAVIGATION OF A $2xCO_2$ CLIMATE

Water transport is the most efficient means of moving bulk cargo and the Great Lakes, the busiest waterway in the world, serve the waterborne cargo requirements for 17 states and four provinces in North America.

The socio-economic model used in this study was developed by the International Joint Commission's Lake Erie Regulation (ILER) Study Board. The Board was established in 1977 to investigate the feasibility of limited regulation of Lake Erie because of the record high water levels in the early seventies. Since the release of the ILER study, researchers at the University of Wisconsin's Sea Grant Institute have substantially modified the model for various water level and flow conditions, and these modifications were used in the present study.

The model determines for each month the allowable draft for shipping along each of the trade routes in the system, based on available water depths under a given regime of lake levels. These drafts are converted into ship loading capability from which the number of trips required to move the various cargoes is calculated. These compilations require the knowledge of fleet composition, vessel characteristics, operating speeds and other pertinent information of the system. The model output gives the number of trips required to move the particular cargo and, on the basis of vessel operating costs for the various vessel sizes, the monthly transportation costs for each commodity for the particular lake level.

The final output of the model (Table 3) sums up the monthly costs to give annual operating costs for the Canadian fleet for the four major cargoes - iron ore, grain, coal and limestone, which together make up 85% of Great Lakes cargo. For Scenario 1 BOC conditions during the period 1900-1976, the average annual cost for the four commodities is $197.3 million (1979 U.S. dollars). Costs for each commodity are: iron ore, $78.8 M; grain $77.5 M; coal $31.4 M; and limestone $9.6 M. During the 77-year period of record, the maximum annual cost was $207.1 M, the minimum $193.5 M. During the period of low water levels in 1963-65, the calculated annual operating costs for each year were $202.6 M, $207.1 M and $203.2 M respectively. Throughout the 77-year study period, there were 8 years when operating costs were of this magnitude.

Various scenarios can be run on the ILER model. If climatically induced changes in Great Lakes hydrology are added to the model with tonnages remaining the same (Table 3, column 2) average annual costs increase by almost $10 M to $206.9 M, because of the greater number of trips required, with a minimum of $196.8 M and maximum of $227.0 M. Since the frequency of low water levels is increased, the model projected that in 53 out of 77 years or 69% of the time, annual operating costs would be similar to those for the difficult 1963-65 period.

Tableau 2

Fréquence d'occurrence de faibles niveaux d'eau des Grands Lacs (pourcentage des années où le niveau est égal ou inférieur aux niveaux moyens de 1963 à 1965)

Lac	A Niveaux moyens (période de référence) + accroissement de la consomm.	B Changement de climat	C Changement de climat
Supérieur	10	61	79
Michigan	8	57	77
Érié	5	38	77

Le graphique de la figure 6 montre les niveaux qui se seraient produits dans le lac Érié par suite d'un changement de climat durant la période de 1900 à 1976. Le tableau 2 indique la fréquence d'occurrence de niveaux extrêmement faibles (comme durant les années 30 et 60) qui se produiraient selon le scénario climatique du doublement du CO_2 et de l'accroissement de la consommation d'eau. Dans plus de 75 % des années considérées, le niveau de l'eau serait aussi faible dans les lacs Supérieur, Michigan, Huron et Érié. Pour les raisons déjà mentionnées, le lac Ontario n'est pas traité dans notre analyse.

COUVERTURE MAXIMALE DE GLACE PRÉVUE DANS LE SCÉNARIO CLIMATIQUE DU DOUBLEMENT DU CO_2

D'après nos recherches relatives à la couverture de glace des Grands Lacs prévue dans le scénario climatique du doublement du CO_2, la couverture maximale moyenne diminuerait de la façon suivante : de 72 à 0 % dans le lac Supérieur, de 38 à 0 % dans le lac Michigan, de 65 à 0 % dans le lac Huron, de 90 à 50 % dans le lac Érié et de 33 à 0 % dans le lac Ontario. Il faut pousser l'analyse pour produire une meilleure estimation de la durée de l'englacement, mais nos travaux révèlent que, selon le scénario climatique du doublement du CO_2 du GISS, les glaces ne poseraient un problème que durant un mois la plupart des années.

En ce qui touche notre modèle des effets sur la navigation maritime, le paramètre d'entrée pertinent employé pour la détermination de la répartition mensuelle des marchandises transportées est la durée de la saison de navigation. Nous avons établi une saison de navigation de onze mois au lieu de la saison actuelle de huit mois et demi, étant donné que les glaces ne causeraient un problème qu'un mois par année.

Quant aux effets de la glace sur la production hydro-électrique, les endroits où les problèmes seraient les plus importants sont la rivière Niagara et le fleuve Saint-Laurent. Il existe actuellement une estacade à l'embouchure de la Niagara qui sert à réduire le risque d'embâcles pouvant faire diminuer le débit aux prises d'eau des centrales hydro-électriques. La diminution prévue de l'englacement en vertu du scénario du doublement du CO_2 réduirait les effets négatifs de ce phénomène et la durée de son

Under the scenario of $2xCO_2$ conditions and lake level and flows changes, the annual energy production at the St. Mary's plant is estimated by the model to increase by 2.5% to 410 GW.h. This is due to the increase in the difference in elevation between Lake Superior and Lakes Michigan-Huron since levels in the latter are reduced more than those of Lake Superior.

As far as the Niagara plants are concerned, with the expected reduced level of Lake Erie, production at the DeCew plants is estimated to decrease by 18% to a mean annual production of 709 GW.h and production at the Beck plant would decrease by approximately 13% to a mean annual production of 10,260 GW.h. if present Lake Ontario levels are maintained by the Ontario Levels Board. However, if the average level of Lake Ontario is allowed to decrease by 30 cm and 60 cm, the output of the Robert Saunders plant would be reduced by 2% and 5% respectively.

Under the scenario of climatic changes plus increased consumptive use, the level of Lakes Michigan-Huron would be reduced more than that of Lake Superior. Thus, the output at the St. Mary's plant would show a slight increase to 411 GW.h. As far as the Niagara power plants are concerned, adding the consumptive use effect reduces the mean annual level of Lake Erie to 173.29 m, a drop of 68 cm from the BOC mean annual lake level, and the outflow from lake Erie is reduced by 8%. Thus the mean annual output of the DeCew plant would be reduced by approximately 39% to 526 GW.h. and the annual production at the Beck plants would fall 22% to 9190 GW.h. over BOC conditions. As far as the St. Lawrence plants are concerned, because of the inability of the model to produce realistic level and outflow values for Lake Ontario, we did not add the effect of consumptive to the St. Lawrence plants' production.

ECONOMIC IMPACT OF CLIMATIC CHANGE ON HYDRO GENERATION

Since hydro-electric generation is the cheapest form of electricity production, it is utilized to the maximum, and any loss of hydro production results in the use of more expensive forms of power generation. In Ontario the most likely substitute for hydro would be a mix of nuclear and fossil fuel generation.

Ontario Hydro's fuel costs for its nuclear and fossil plants in 1979 were $606 million, ($U.S. 1979) with these plants accounting for 60% of generated energy of 63,200 GW.h. It was estimated that nuclear and fossil fuel generation cost $367 million for operation, maintenance, and administration costs giving total operating expenses of $973 million. Expressed economically, generated nuclear and fossil fuel energy cost approximately $15,500 per GW.h. The production losses resulting from the climatic change scenario for the three largest Canadian stations would total 2220 GW.h., and adding consumptive use would result in a total loss of 4165 GW.h. Replacing this lost production with a mix of nuclear and fossil fuel generation would thus cost Ontario Hydro $34.4 M and $64.6 M, ($U.S. 1979) annually for the two cases.

CLIMATE AND ENERGY DEMAND

Electrical energy demand consists of two components: a base demand and a seasonal demand. The base demand is determined by non-climatically relate factors and is influenced primarily by the size of the consuming population and the level of economic activity. Long term changes in demand occur largely as a result of changes in economic and demographic factors. These factors were used in the Ontario Hydro 1984 forecasting model on which the future energy consumption projections used in this study are based.

The Ontario Hydro Energy Demand report gives Ontario Hydro's projections of Ontario energy demand to the year 2013. The major differences between energy demand figures for 1984 and those for 2013 are a growth in energy demand of 2.69% per annum for 1984-1993, 2.39% per annum for 1994-2003, and 1.96 per annum for 2004-2013 and large summer energy demand by the year 2013. We used the trend outlined in the Ontario Hydro forecast, and found that energy consumption would be expected to increase by 1.46% per annum from 2014 to 2023 and by 0.86% per annum from 2024 to 2035 to an annual energy demand for the year 2035 of 280,520 GW.h.

The seasonal demand is influenced by the weather, and is made up of electricity consumption for heating and cooling. Numerous studies have shown that the demand for energy is strongly correlated with changes in mean temperature. Figure 7 shown the relationship for Ontario mean monthly electricity energy demand and mean monthly temperatures at Toronto International Airport for 1984. Toronto International Airport was chosen as a representative temperature station, since the largest part of Ontario Hydro's energy demand occurs in Southern Ontario. A linear regression equation was obtained for this energy/temperature relationship, with a correlation coefficient of 0.96. This means that temperature can be said to "explain" 92% of the variation in electricity demand.

Under the $2xCO_2$ climate scenario, the mean temperature in Ontario is expected to increase by 4.5°C, with an increase in the winter months of 5-6°C. Using the relationship between temperature and energy demand obtained above we found that the winter temperature increase would reduce the projected energy demand by 6533 - 7840 GW.h. A summer increase in temperature of 3 - 4°C would increase energy demand by 162 - 216 GW.h. Thus, the net effect of a $2xCO_2$ climate would be a 2 - 3 % annual reduction of energy demand for a saving of $100 - 118 M. for Ontario Hydro. Thus while future climatic change would reduce hydro electric production in the Canadian generating stations in the Great Lakes, it would also reduce energy demand.

CONCLUSIONS

This study used the output of several computer models developed by specialists in other fields and it is acknowledged that all such models contain many uncertainties. However, they do represent the "best guess"

at the present time of future developments, both hydrologic and economic, in the Great Lakes.

If the climate change scenarios outlined here occur, there would be significant changes in the general hydrology of the Great Lakes. Average levels and mean flows would be reduced. Even more significant, however, is the fact that with the natural variability in the system the occurence of low levels and flows would increase.

Under the 2 x CO_2 climate scenarios, maximum ice cover would be reduced to 0% on all the lakes except Erie, which because of its shallow depth and low storage capacity, would have an ice cover of 50% (rather than the present 90%) in the average year.

If we consider the IJC scenario of increased consumptive use of Great Lakes water by the year 2035, and the reduction in ice cover as well as climatic change, there would be additional effects on levels and flows. Levels would be reduced by as much as 80 cm, flows by up to 20% and the frequency of low levels, as in the 1930's and 1960's would occur in 7 years out of 10.

Using economic models developed by the International Joint Commission and modified by University of Wisconsin scientists, the effect of such changes in Great Lakes hydrology can be converted into costs of operation for Great lakes shipping companies and the production of hydro electric power. The average annual costs to Canadian Great Lakes shipping companies, for the four principal bulk cargoes (iron ore, grain, coal, limestone) would increase 30% and the frequency of years when costs equal or exceed those of the mid 1960's would be more than 9 years in 10.

With warmer temperatures in this 2xCO_2 climate scenario, there would be a decline in energy demand of approximately 2-3%, resulting in an annual saving to Ontario Hydro of $172-204 M ($ 1984). Because of the changes in hydrology in the Great Lakes system, the mean annual production at the two largest hydro plants on the lakes (Sir Adam Beck and Robert Saunders) would be reduced approximately 20%, which, if replaced by nuclear and fossil fuel, would cost $111 M ($C 1984) annually. Combining reduction in demand with reduction in generation would result in a $61 to $92 M ($C 1984) annual saving for Ontario Hydro.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research summarized in this report was done under contract by the Great Lakes Institute of the University of Windsor. The GLI is a multi-disciplinary Institute and the only University-based institute in Canada devoted to Great Lakes research. It has recently completed a 3 year study of four toxic contaminants in the Detroit - St. Clair region.

The research team for the AES contract included Marie Sanderson (Co-ordinator and Director, GLI), Darrell Marchand, David Howe, Cathy Alpaugh, Christine Loebach and Peter Stokoe. Special thanks are given to C.F. Southam, Canada Centre for Inland Waters; Eric Loucks, University of Wisconsin; and R. Assel, Great Lakes Environment Research Laboratory, Ann Arbor, for advice and help with the various models.

List of Tables

Table 1. Summary of Hydrologic Evaluation of Climatic Changes Scenarios in the Great Lakes

Table 2. Frequency of Low Lake Levels (% of years with level at or below 1963-65 means)

Table 3. Annual Navigation Costs - Canadian Fleet

List of Figures

Figure 1. Location of data points in Great Lakes Basin from GISS climatic climatic change model

Figure 2. January Average Temperatures - 2A - present measured 1951-80
2B - GISS Projected $2xCO_2$ climate

Figure 3. July Average Temperatures - 3A - present measured 1951-80
3B - GISS Projected $2xCO_2$ climate

Figure 4. January Average precipitation (mm) - 4A- Present measured 1951-80
4B - GISS Projected $2xCO_2$ climate

Figure 5. September Average Precipitation (mm) - 5A - Present measured 1951-80
5B - GISS Projected $2xCO_2$ climate

Figure 6. Lake Erie Yearly Mean Levels 1900-1976

———————. Basic of Comparison
----------. Climatic Change
.———.——.———. Climatic Change plus Consuptive Use

Figure 7. Relationship between average monthly temperature and energy demand Toronto, Ontario.

Table 1

SUMMARY OF HYDROLOGIC EVALUATION OF CLIMATIC CHANGE SCENARIOS IN THE GREAT LAKES

	A BASIS OF COMPARISON		B CLIMATIC CHANGE		C CLIMATIC CHANGE & CONS.USE	
	LEVEL[1]	OUTFLOW[2]	LEVEL	OUTFLOW	LEVEL	OUTFLOW
LAKE SUPERIOR						
Mean	183.01	2204	182.80	2209	182.71	2198
Monthly Max	183.47	3483	183.46	3483	183.45	3455
Monthly Min	182.48	1557	182.27	1557	182.16	1557
Range	0.99	1926	1.19	1926	1.29	1898
MICHIGAN-HURON						
Mean	176.26	5236	175.67	4599	175.43	4357
Monthly Max	177.41	6570	176.53	5720	176.28	5635
Monthly Min	175.40	3171	174.74	3143	174.46	2917
Range	1.74	3398	1.79	2577	1.82	2718
ERIE						
Mean	173.97	5867	173.53	5086	173.29	4642
Monthly Max	174.83	7646	174.39	6739	174.14	6258
Monthly Min	173.16	4304	172.63	3540	172.36	3115
Range	1.67	3342	1.76	3199	1.78	3143
ONTARIO						
Mean	74.57	6856	73.72	5899	73.88	5299
Monthly Max	75.78	8778	75.49	8637	76.21	8353
Monthly Min	73.64	5324	69.63	5324	69.20	4814
Range	2.14	3454	5.86	3313	7.01	3539

(1) Levels in metres
(2) Outflow in $m^3\ sec^{-1}$

SOURCE: Southern and Dumont, Inland Waters Directors, Environment Canada.

Table 2

Frequency of Low Lake Levels (% years with level at or below 1963-65 means)

Lake	A mean level (BOC)	B climatic change	C Climatic change & consumptive Use
Superior	10	61	79
Michigan	8	57	77
Erie	5	38	77

Table 3

Annual Navigation Costs - Canadian Fleet
(1979 U.S. x 1,000,000)

	Scenario 1 BOC (1900-77)	Scenario 2 Climate Change	Scenario 3 Climate Change & c.u
Iron Ore	78.8	84.0	86.6
Grain	77.7	80.0	75.7
Coal	31.4	33.2	91.6
Limestone	9.6	9.7	8.3
Total:Mean	197.3	206.9	262.2
Max.(1)	207.1	227.0	299.6
Min.(2)	193.5	196.8	240.0

(1) Maximum cost during period 1900 - 1977

(2) Minimum cost during period 1900 - 1977

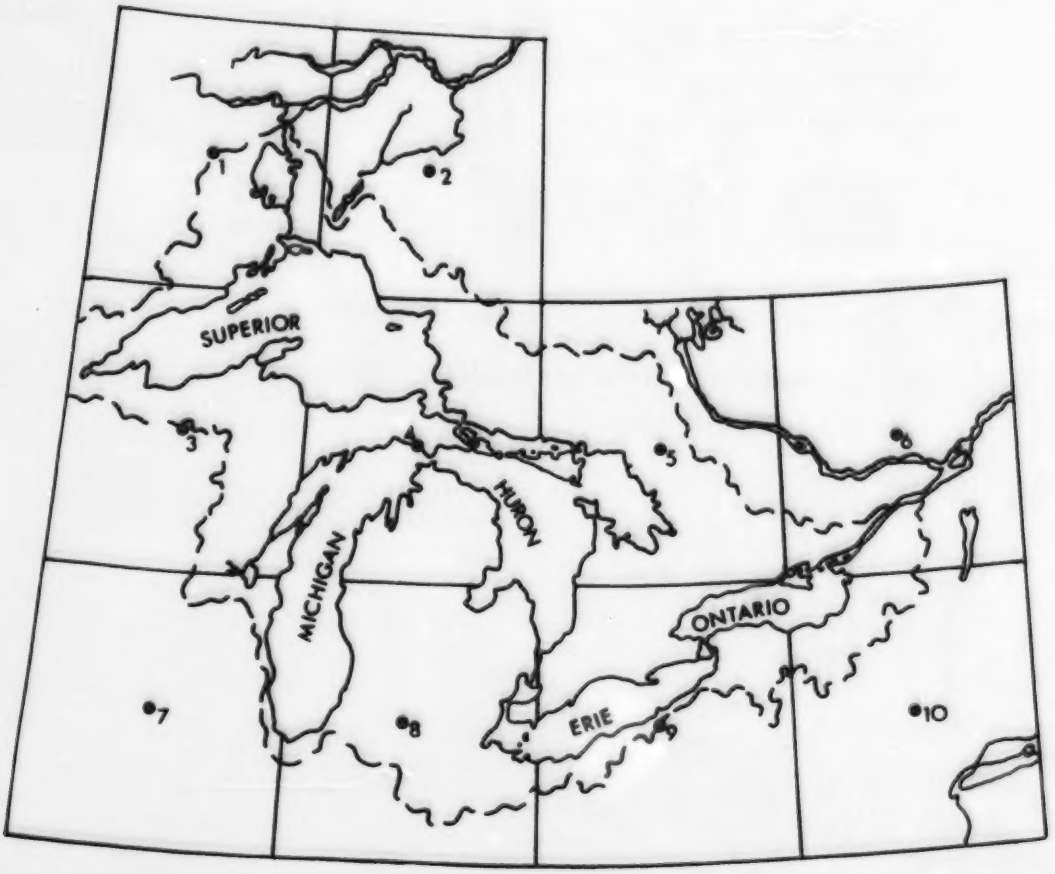
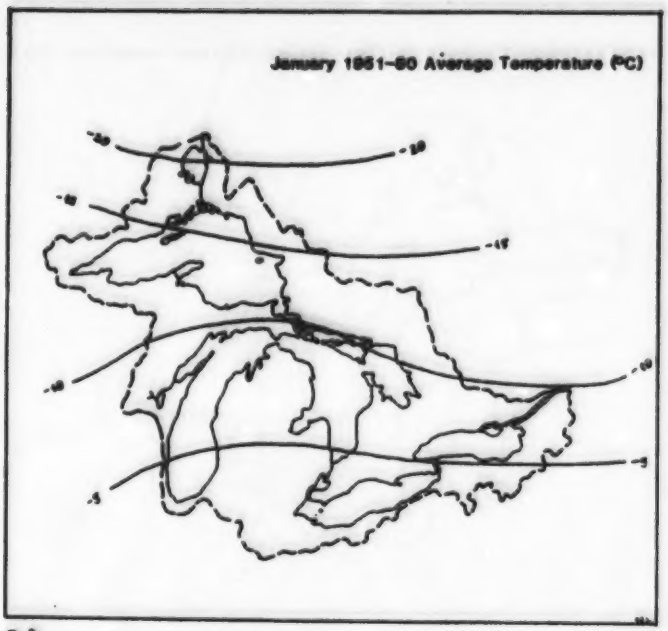
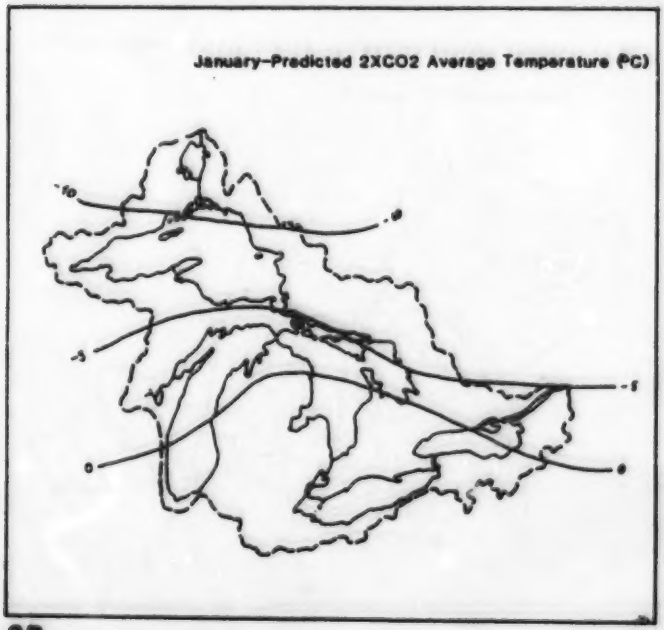


Figure 1. Location of data points in Great Lakes Basin from GISS climatic change model

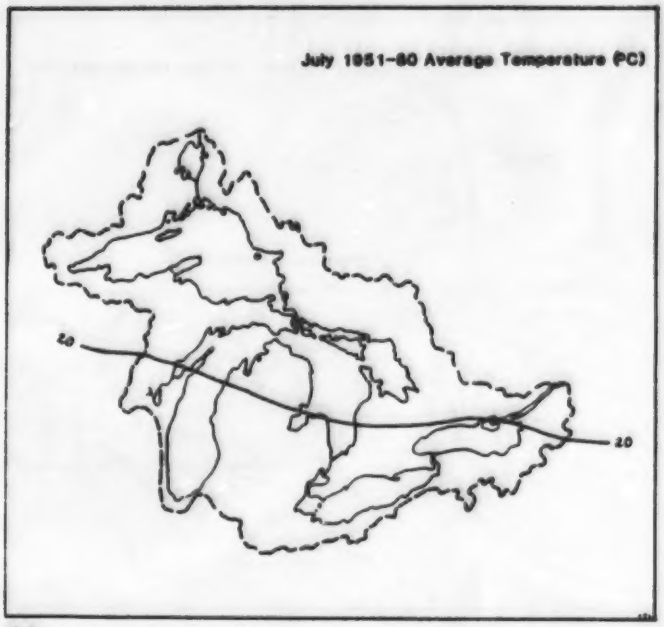


2A

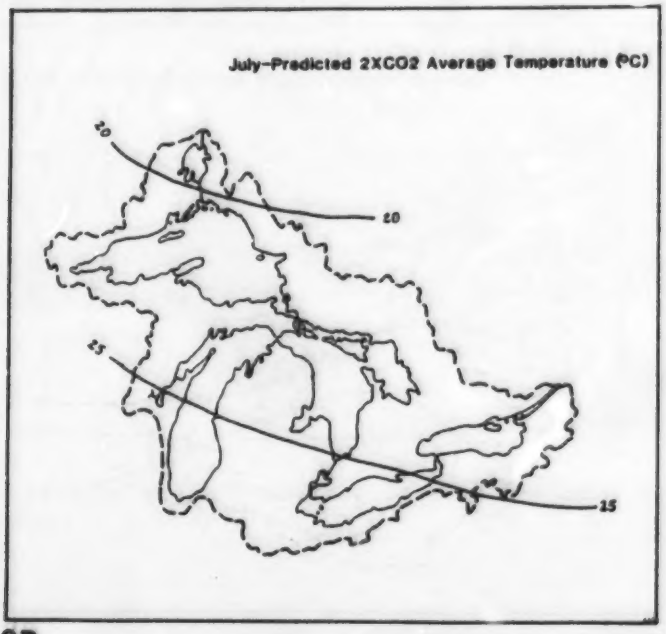


2B

Figure 2.
January Average Temperatures (mm) - 2A - Present measured 1951-80
2B - GISS Projected $2xCO_2$ climate.



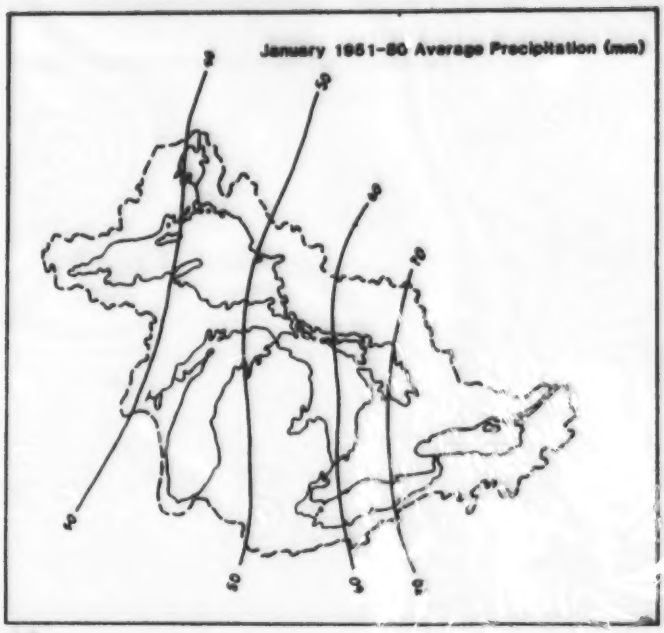
3A



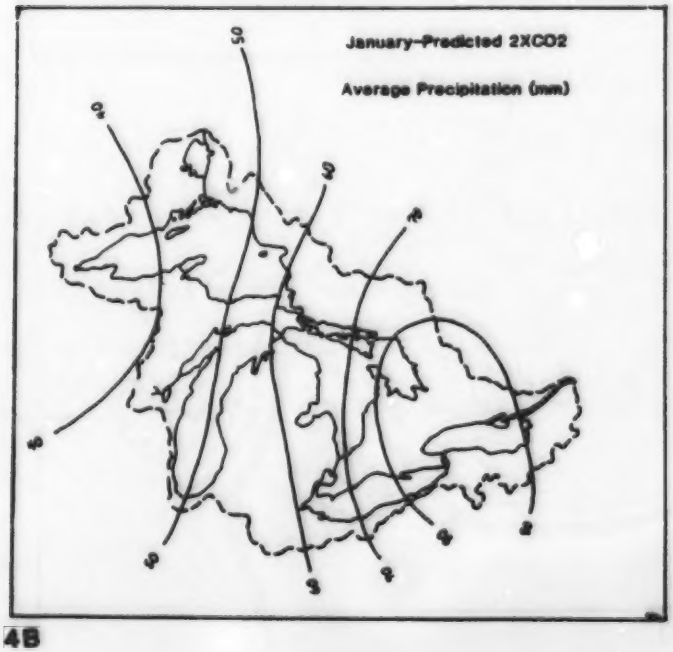
3B

Figure 3

July Average Temperatures - 3A - Present measured 1951-80
3B - GISS Projected $2xCO_2$ climate.



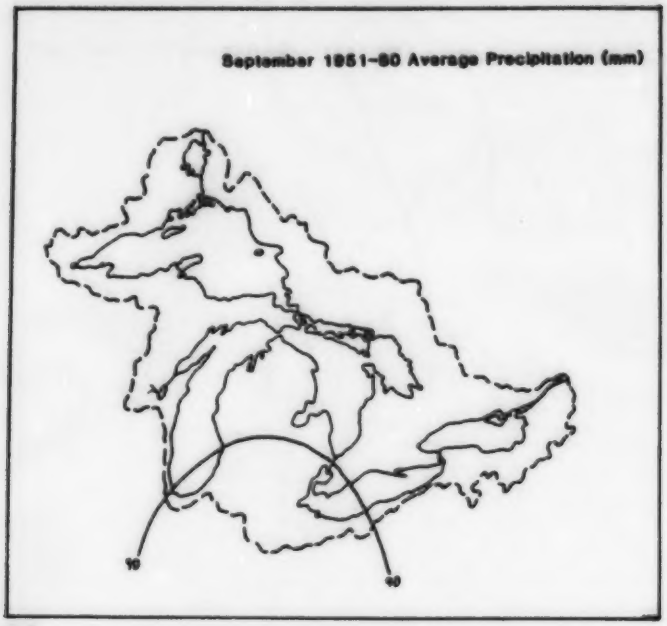
4A



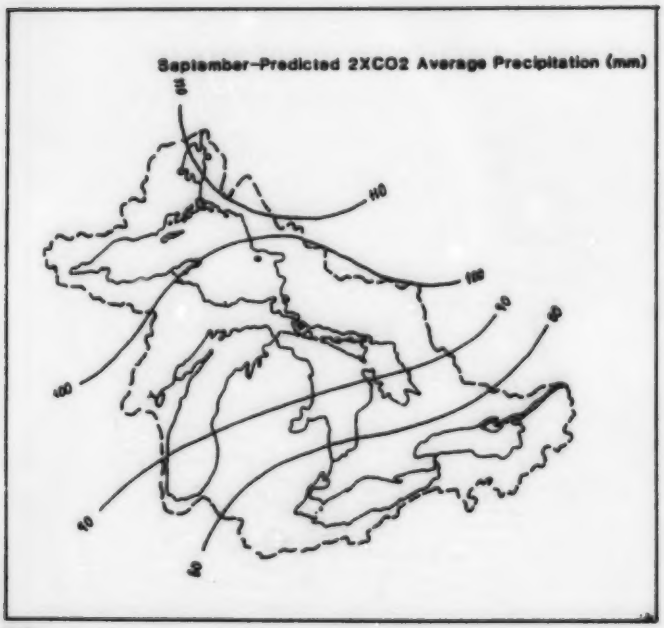
4B

Figure 4

January Average Precipitation (mm) - 4A - Present measured 1951-80
4B - GISS Projected $2xCO_2$ climate.



5A



5B

Figure 5.
September Average Precipitation (mm) - 5A - Present measured 1951-80
5B - GISS Projected $2xCO_2$ climate.

YEARLY MEAN LEVELS - LAKE ERIE

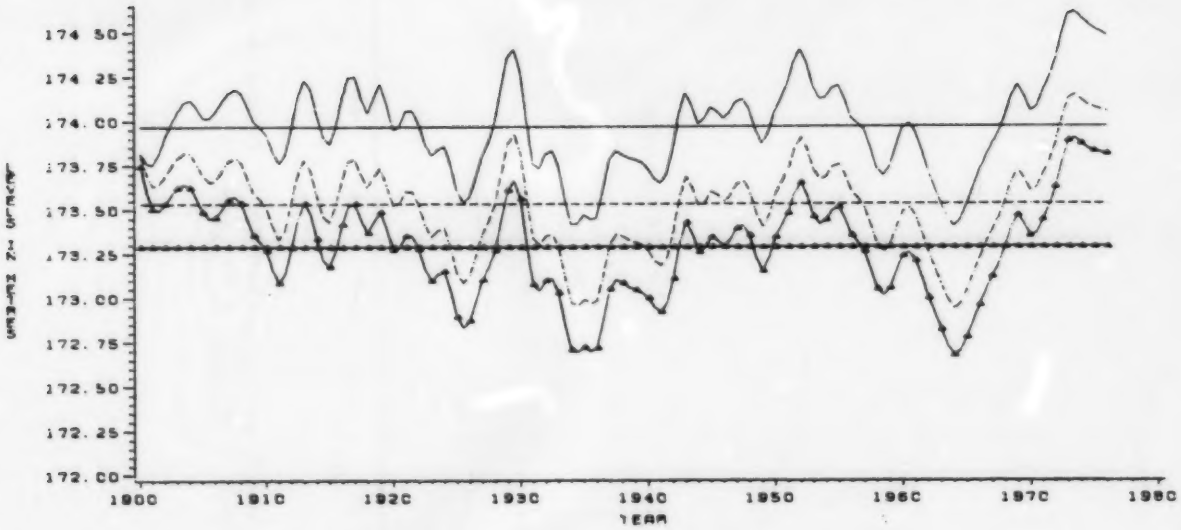


Figure 6. Lake Erie Yearly Mean Levels 1900 - 1976

_____ Basis of Comparison

- - - - - - Climatic Change

Climatic Change plus Consumptive Use

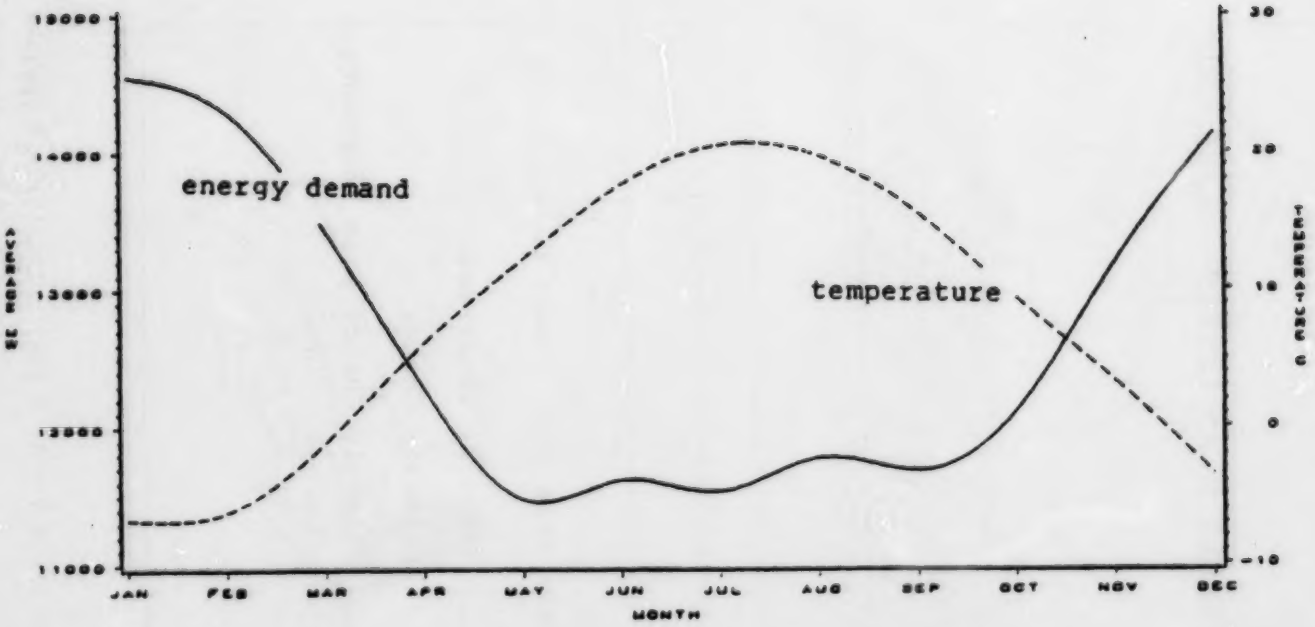


Figure 7. Relationship between average monthly temperature and energy demand - Toronto, Ontario

Environnement Canada
Environment Canada

Canada

SOMMAIRE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

SCC 87-01 Programme canadien des incidences climatologiques

SCC 87-02 Conséquences de changement climatique sur l'agriculture en Ontario

SCC 87-03 Répercussions d'un changement de climat sur la navigation et la production d'électricité dans les Grands Lacs

Environnement Canada Environment Canada

RÉPERCUSSIONS D'UN CHANGEMENT DE CLIMAT SUR LA NAVIGATION ET LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ DANS LES GRANDS LACS

Résumé de rapports de l'Institut des Grands Lacs

Phase I - Socio-economic Assessment of the Implications of Climatic Change for Future Water Resources in the Great Lakes-St. Lawrence River System, mars 1985 (en anglais seulement).

Phase II- Socio-economic Assessment of the Implications of Climatic Change for Commercial Navigation and Hydro-Electric Power Generation in the Great Lakes-St. Lawrence River System, mars 1986 (en anglais seulement)

Produit par

Marie Sanderson
Institut des Grands Lacs
Université de Windsor
Windsor (Ontario)

Pour inclusion dans le
Sommaire du changement climatique
Service de l'environnement atmosphérique

Septembre 1987

DÉNÉGATION DE RESPONSABILITÉ

La présente publication renferme le résumé des résultats d'études menées en vertu d'un contrat par le groupe de l'Institut des Grands Lacs de l'université de Windsor pour le Centre climatologique canadien. Les avis et opinions qui y sont exprimés sont ceux des auteurs. Ils n'expriment, ni ne reflètent nécessairement ceux du gouvernment du Canada ou de tout organisme de celui-ci.

Pour obtenir à titre gracieux des exemplaires de cette publication, écrire au :

Bureau du programme climatologique
Centre climatologique canadien
4905 Rue Dufferin
Downsview (Ontario)
M3H 5T4

Pour acheter des exemplaires des rapports au complet, écrire à :

Institut des Grands Lacs
University of Windsor
Windsor (Ontario)
N9B 3P4

Publie avec l'autorisation du
ministre de l'Environnement

©Ministre des Approvisionnements
et Services Canada 1987

No de catalogue EN57-27/1987-03
ISBN 0-662-55490-6
ISSN 0835-3980

AVANT-PROPOS

L'atmosphère terrestre subit de grands changements dans sa composition à l'échelle mondiale. Les activités humaines, comme le déboisement, l'utilisation des combustibles fossiles et, même, les opérations agricoles ont nettement accru la quantité de gaz carbonique et d'autres "gaz de serre" de l'atmosphère. Il est de mieux en mieux établi du point de vue scientifique que l'accroissement de la concentration de ces gaz pourrait entraîner, au cours des prochaines décennies, une augmentation de la température moyenne mondiale supérieure à toute autre augmentation survenue depuis l'arrivée de l'homme sur terre (cf. conférence de Villach, Australie, octobre 1985). D'après les études, on pourrait s'attendre à un réchauffement mondial moyen de 1,5 à 4,5 °C; dans les régions arctiques, il est probable que ce réchauffement sera encore plus élevé.

Ces dernières années, on a de plus en plus pris conscience, à l'échelon international du fait que divers secteurs économiques sont tributaires des fluctuations climatiques et des répercussions du changement climatique à long terme. On appréhende la perte éventuelle de zones côtières due à la hausse mondiale prévue du niveau des mers, à la destruction des habitats d'innombrables espèces végétales et animales et à la perturbation de l'agriculture mondiale, pour ne citer que quelques sujets de préoccupation. Par la même occasion, le changement climatique offre éventuellement d'intéressantes possibilités économiques. Pour le Canada, celles-ci comprennent sans doute une prolongation de la saison de croissance et une navigation marchande active à longueur d'année sur les Grands Lacs. L'élément clef d'une bonne adaptation à ces changements sera notre aptitude à atténuer les effets négatifs et à tirer parti des avantages.

Ayant reconnu l'effet du climat et des fluctuations climatiques sur la société, le Canada a, en 1978, établi un Programme climatologique canadien pour intégrer les efforts de divers organismes fédéraux et provinciaux, ainsi que des universités et du secteur privé, dans le domaine de la climatologie. On a confié la responsabilité du programme au Service de l'environnement atmosphérique (SEA), d'Environnement Canada. Ce service est donc l'organisme responsable en la matière. Depuis 1984, un des éléments du programme se concentre sur les études de recherche destinées à évaluer et à déterminer les effets sociaux et économiques éventuels du réchauffement climatique auquel on s'attend suivant un scénario où la concentration de gaz carbonique doublerait. La plupart de ces études furent menées en vertu de contrats par des universités canadiennes.

Ces études et d'autres études réalisées au cours des dernières années ont clairement montré que l'accroissement des concentrations de "gaz de serre" peut bel et bien exercer des effets profonds sur notre milieu physique, mais il faut encore en considérer les résultats comme préliminaires. Les scientifiques s'entendent assez bien sur l'évolution du changement climatique à long terme, mais il existe de l'incertitude dans les estimations de l'ampleur et des échéances.

Il va de soi qu'il faut d'autres études pour fournir des renseignements de planification et d'orientation à tous les paliers d'administration et aux usagers du secteur privé. Ces études aideraient encore à établir les stratégies éventuelles d'atténuation et d'adaptation et répondraient au thème d'Environnement Canada : "Prévoir pour prévenir."

G.A. Sainte-Marie
Sous-ministre
Environnement Canada

PRÉFACE

Le Centre climatologique canadien (CCC) a financé plusieurs études touchant les effets éventuels, sur divers secteurs de l'économie canadienne, du réchauffement du climat prévu du fait de la concentration croissante des "gaz de serre" dans l'atmosphère. On a retenu le cas d'une quantité deux fois plus importante de CO_2.

Les projections des futures variables climatiques en vertu de ce scénario (concentration doublée de CO_2) sont adaptées de deux modèles américains de circulation générale, l'un mis au point par le Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) et l'autre par le Goddard Institute for Space Studies (GISS). Les chercheurs ont utilisé les prévisions de ces modèles informatiques ou d'autres variables dérivées comme données d'entrée de divers modèles socio-économiques. Grâce à ces outils, ainsi qu'à l'analyse des anomalies climatiques du passé et de leurs effets, les chercheurs déterminent certaines des répercussions de première importance d'une augmentation de la concentration de CO_2 et du changement climatique.

Le premier numéro du Sommaire du changement climatique indique les principales études de prospective socio-économique entreprises depuis 1984. La liste des titres antérieurs de la série figure au verso de la première page de couverture. La troisième présente les résultats sommaires de deux phases d'une étude pour analyse des incidences des changements de climat sur la navigation et la production hydro-électrique dans les Grands Lacs. Les éléments de numéros ultérieurs comprendront d'autres résumés d'études, ainsi que des articles pertinents à d'autres questions de changement climatique.

J.A.W. McCulloch
Directeur général
Centre climatologique canadien

POINTS SAILLANTS

L'étude considérée, fondée sur l'établissement d'un scénario spécifique de changement de climat (GISS, 1984) et sur des modèles hydrologiques et économiques, a permis de tirer les conclusions suivantes en ce qui concerne les répercussions d'un changement de climat dû à un doublement des concentrations de CO^2 sur la navigation maritime et la production d'électricité dans les Grands Lacs.

- Le niveau moyen de l'eau des Grands Lacs pourrait baisser de 30 à 80 centimètres et le débit moyen dans les chenaux pourrait diminuer dans une proportion atteignant 20 %.

- Si le climat change et si la consommation de l'eau des Grands Lacs augmente, le niveau de l'eau serait bas huit ans sur dix (comme ce fut le cas dans les années 30 et 60).

- La couverture maximale de glace pourrait passer de 72 à 0 % dans le cas du lac Supérieur, de 38 à 0 % sur le lac Michigan, de 65 à 0 % sur le lac Huron, de 90 à 50 % sur le lac Érié et de 33 à 0 % sur le lac Ontario, de sorte que les eaux seraient libres de glace onze mois sur douze.

- Les coûts annuels moyens des transporteurs maritimes du Canada dont les navires sillonnent les Grands Lacs pourraient augmenter d'environ 30 % pour les quatre principaux types de chargements: minerai de fer, céréales, charbon et calcaire.

- Neuf années sur dix, les coûts de transport maritime pourraient être égaux ou supérieurs à ceux de la période de faible niveau d'eau de 1963-1965.

- Le changement du climat et l'augmentation de la consommation d'eau pourrait entraîner une perte de potentiel de 4 165 gigawattheures (GWh) pour les centrales hydro-électriques situées dans la partie canadienne de la région des Grands Lacs. Si elle comble cette perte pa l'exploitation de centrales nucléaires et de centrales alimentées par des combustibles fossiles, Ontario Hydro pourrait avoir à débourser 65 000 000 $ (dollars U.S. de 1979) annuellement. En convertissant ces coûts en dollars canadiens 1984 cela donne $111 M.

- Le réchauffement du temps fera baisser la demande d'énergie en hiver et la fera monter légèrement en été, ce qui permettra à Ontario Hydro de réaliser une économie moyenne de 172 à 204 millions de dollars par année ($C 1984). Compte tenu des coûts de remplacement mentionnés ci-dessus, cet organisme fera des économies annuelles moyennes de 61 à 92 millions de dollars. ($C 1984).

INTRODUCTION

Selon les climatologues du monde entier, l'accroissement des concentrations de CO_2 dans l'atmosphère entrainera d'importants changements de climat au cours du XXI siècle. Les répercussions de ces changements sur le niveau de l'eau et le débit des Grands Lacs et les effets qui s' ensuivront pour la navigation maritime et la production d'électricité constituent un problème auquel il faut s'attaquer. Pour prévoir l'évolution d'un important réseau hydrographique, les scientifiques supposent généralement que les conditions antérieures persisteront étant donné que les mesures des niveaux et des débits effectuées sur une période d'environ un siècle ne révèlent pas de tendances marquées. Toutefois, ces hypothèses ne vaudront plus s'il se produit un changement de climat. Il est donc important que les sociétés de navigation maritime et les producteurs d'électricité connaissent les incidences de cc changement sur leurs activités.

Le présent numéro du Sommaire du changement climatique résume les résultats de recherches effectuées par l'Institut des Grands Lacs de l'Université de Windsor. La première phase des travaux, qui s'est terminée en mars 1985, comprenait une étude documentaire des incidences du CO_2 sur le climat, l'établissement d'un cadre théorique décrivant la façon dont le changement de climat peut affecter la navigation et la production d'électricité dans les Grands Lacs et l'analyse de l'efficacité de plusieurs modèles pour l'évaluation des effets des changements de climat. La seconde phase des travaux, qui a pris fin en mars 1986, a permis de faire une analyse préliminaire, à l'aide des modèles appropriés, des incidences des changements de climat sur la navigation et la production hydro-électrique dans les Grands Lacs. Le présent rapport livre les résultats obtenus durant les deux phases des recherches.

Le Centre climatologique canadien a fourni aux chercheurs une projection des conditions climatiques dans le bassin des Grands Lacs en supposant un doublement des concentrations atmosphériques de CO_2 par rapport à celles mesurées avant la période industrielle. Les données sur les valeurs mensuelles des températures et des précipitations représentaient la sortie modifiée du modèle de circulation générale de l'atmosphère établi par le Goddard Institute of Space Studies (GISS). Le réchauffement annuel moyen prévu par ce modèle pour le bassin des Grands Lacs est d'environ (légèrement plus élevé en hiver et moins important en été). Selon les projections, les précipitations annuelles augmenteraient de quelque 8 % en certains points dans le centre et l'ouest d mais diminueraient de 3 à 6 % dans sa partie est. Les modèles de grande échelle comme celui dont il est question ici comportent de nombreuses incertitudes et leurs produits constituent de vagues estimations des conditions climatiques futures en un endroit 4 donné.

Il est également difficile d'appliquer la sortie du modèle au bassin des Grands Lacs en raison du fait qu'il n'existe que dix sources de données à l'intérieur ou à proximité de la zone considérée (figure 1).

Les figures 2 à 5 montrent les conditions climatiques actuelles et prévues dans le bassin des Grands Lacs. Les valeurs mensuelles aux dix points d'observation, mesurées par le Service de l'environnement atmosphérique, indiquent les moyennes courantes, les changements d'après le sénario du GISS et les projections des valeurs advenant un doublement des concentrations de CO_2 La figure 2A présente les isothermes moyennes de janvier pour la période de 1951 à 1980 mesurées par le Service de l'environnement atmosphérique. On peut constater que la valeur des isothermes parallèles aux lignes de latitude et les températures baissent assez uniformément de -5°C dans le sud du bassin à -20°C dans sa partie nord. Selon le scénario du GISS (figure 2B), les températures de janvier seraient de 0°C dans le sud du bassin et de -10 à -15°C au nord du lac Supérieur. Dans une grande partie du bassin, les températures moyennes de janvier seraient supérieures à 0°C. Les figures 3 présentent les températures de juillet, le mois le plus chaud de l'année, soit les normales actuelles (figure 3A) et les isothermes prévues selon le scénario du GISS. A l'heure actuelle, les températures moyennes sont plutôt uniformes dans tout le territoire considéré, depuis 21 °C dans le sud jusqu'à 15°C dans le nord. D'après le scénario des conditions climatiques dues au doublement du CO_2 établi par le GISS (figure 3B), la température moyenne de juillet monterait jusqu'à 25°C environ dans le bassin.

La configuration actuelle des précipitations en janvier (figure 4A) représente des quantités annuelles de 70 mm dans l'est du bassin et de 40 mm dans la partie ouest. Le scénario du GISS implique un accroissement des précipitations aux alentours du lac Ontario ainsi qu'un déplacement vers l'ouest des isolignes. Les cartes des précipitations en septembre (le mois où il y aurait le plus de changements selon le scénario) apparaissent à la figure 5:les hauteurs de précipitations sont plutôt uniformes à environ 90 mm mois actuellement (figure 5A) alors qu'elles le seraient moins dans l'avenir, soit de 80 mm dans le sud-est du bassin à 100 mm dans le nord-ouest (figure 5B). En ce qui touche les précipitations totales annuelles, le scénario indique une diminution de 6 % dans le sud-est du bassin, mais une augmentation de 18 % dans le nord-ouest.

CONDITIONS HYDROLOGIQUES DANS LES GRANDS LACS SELON LE SCÉNARIO CLIMATIQUE DU DOUBLEMENT DES CONCENTRATIONS DE CO_2

Nos chercheurs disposaient de trois ensembles de données produits par un modèle hydrologique des Grands Lacs fourni par la Direction générale des eaux intérieures (Environnement Canada)

La période de référence pour les comparaisons était celle de 1900 à 1976. Le premier ensemble de données (scénario A, tableau 1) indique les valeurs annuelles moyennes du niveau des lacs et des débits dans les chenaux durant la période de référence compte tenu des dérivations, des pratiques de régularisation et des caractéristiques physiques des lacs et des chenaux (les débits résultant de dérivations sont de 142 $m^3 s^{-1}$ dans le lac Supérieur par le lac Long et la rivière Ogoki, 91 $m^3 s^{-1}$ à partir du lac Michigan à Chicago et 198 m^3s à partir du lac Ontario par le canal Welland. Les pratiques de régularisation correspondent aux plans 77 et 1958-D respectivement pour les lacs Supérieur et Ontario. Ainsi donc, selon les hypothèses, la variabilité des conditions durant la période de référence n'est attribuable qu'à des changements de climat. Durant cette période, la variabilité des niveaux annuels moyens était de 0,99 mm pour le lac Supérieur et de 2,14 m pour le lac Ontario. Le débit sortant moyen varie de 2 204 mspour la rivière St. Mary's (lac Supérieur) à 6 856 ms 1 pour le fleuve Saint-Laurent (lac Ontario).

Le deuxième ensemble de données (B) contient les niveaux et les débits (pour la période de 1900 à 1976) qui se seraient produits selon le scénario climatique du doublement du CO_2 du GISS. Le niveau moyen de l'eau du lac Supérieur baisse de 20 cm, celui des lacs Michigan et Huron de 60 cm, celui du lac Érié de 44 cm et celui du lac Ontario de 85 cm tandis que les débits moyens diminuent de 12 à 14 % dans les chenaux. On a constaté que si le plan actuel de régularisation des eaux du lac Ontario était strictement appliqué dans les conditions climatiques du scénario du GISS, les niveaux et les débits chuteraient considérablement durant les périodes de faible niveau d'eau, comme cela s'est produit durant les années 30 et 60 (amplitude de 5,86 m). Bien sûr, dans la réalité, le Conseil de régularisation des niveaux du lac Ontario ne permettrait pas que ces changements de niveau se produisent et les pratiques courantes de régularisation des eaux seraient modifiées en vue de maintenir des niveaux élevés. C'est pourquoi nous n'avons pas poussé plus loin l'analyse des conditions dans le lac Ontario en vertu du scénario du GISS.

Le troisième ensemble de données (C) comprend les valeurs des niveaux et des débits dus à un changement climatique causé par le doublement du CO_2 et à l'accroissement de la consommation de l'eau des Grands Lacs projetés en 1981 par la Commission mixte internationale pour l'an 2035. Dans ce scénario, le niveau moyen des lacs connaît une baisse supplémentaire de 10 à 20 cm et le débit moyen des rivières Detroit et Niagara diminue de 3 à 6 %.

Tableau 1

RÉSUMÉ DES RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES EFFETS DU CHANGEMENT DE CLIMAT SUR LE RÉGIME HYDROLOGIQUE DES GRANDS LACS SELON DIFFÉRENTS SCÉNARIOS

	A PÉRIODE DE RÉFÉRENCE		B CHANGEMENT DE CLIMAT		C CHANGEMENT DE CLIMAT ACCROISSEMENT DE LA CONSOM.	
	NIVEAU(1)	DÉBIT(2)	NIVEAU	DÉBIT	NIVEAU	DÉBIT LAC
Supèrieur						
Moyenne	183.01	2204	182.80	2209	182.71	2198
Maximum mensuel	183.47	4383	183.46	3483	183.45	3455
Minimum mensuel	182.48	1557	182.27	1557	182.16	1557
Amplitude	0.99	1926	1.19	1926	1.29	1898
Michigan-Huron						
Moyenne	176.26	5236	175.67	4599	175.43	4357
Maximum mensuel	177.41	6570	176.53	5720	176.28	5635
Minimum mensuel	175.40	3171	174.74	3143	174.46	2917
Amplitude	1.74	3398	1.79	2577	1.82	2718
Érié						
Moyenne	173.97	5867	173.53	5086	173.29	4642
Maximum mensuel	174.83	7646	174.39	6739	174.14	6258
Minimum mensuel	173.16	4304	172.63	3540	172.36	3115
Amplitude	1.67	3342	1.76	3199	1.78	3143
Ontario						
Moyenne	74.57	6856	73.72	5899	73.88	5299
Maximum mensuel	75.78	8778	75.49	8637	76.21	8353
Minimum mensuel	73.64	5324	69.63	5324	69.20	4814
Amplitude	2.14	3454	5.86	3313	7.01	3539

(1) En m
(2) En $m^3 s^{-1}$

SOURCE : Southam et Dumont, Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada

In Scenario 3 (Table 3) we added to the model input, increased consumptive use of Great Lakes water, an 11 month shipping season and a 22% increase in coal tonnage shipped. Mean annual costs increased to $262.2 M with maximum of $299.6 M and minimum of $239.8 M for the period 1900-1976. More importantly, however, the frequency of years when costs equalled or exceeded those of the 1963-65 period rose to 75 of the 77 years or 97% of the time.

The socio-economic model, which relates lake levels to shipping costs, lontains many uncertainties but the "best guess" of future conditions indicates that with this scenario of $2xCo_2$ climate, increased consumptive use of the Great Lakes water and slightly increased coal shipments, the average annual costs of Great Lakes shipping will increase by 30% and costs equal to or exceeding those of the 1963-65 period will be incurred with much greater frequency.

IMPLICATIONS FOR HYDRO ELECTRIC POWER GENERATION

Total energy production by Ontario Hydro in 1979 was 103,597 GW.h. (gigawatt hours). Approximately 40% of the power was hydro power and about 41% of Ontario Hydro's hydraulic generation uses Great Lakes water. It is the reliability of the flows through the Great Lakes that makes the Great Lakes stations so valuable for energy generation. In our research we used the ILER models dealing only with Canadian power companies in the Great Lakes System on the St. Mary's River, the Niagara River and the St. Lawrence River. We again used the scenarios of basis of comparison (BOC) for the period 1900-1976, climate change, and climate change with increased consumptive use.

Under BOC conditions, the large hydro generating plants on the Great Lakes make use of the difference in elevation between the upstream and downstream lakes and the resulting flows to produce electrical energy. The mean annual output from the Canadian hydro-electric station on the St. Mary's river is 400 GW.h, 3% of the capacity of the Sir Adam Beck complex at Niagara. The greatest concentration of hydro power facilities in the Great Lakes is at Niagara Falls. On the Canadian side, DeCew Falls and the Sir Adam Beck complex produce the bulk of the power generated. Under BOC conditions, the mean annual output of the DeCew Falls plants is 864 GW.h. and the Adam Beck complex 11,789 GW.h.

Canada and the United States operate a joint hydro-electric generation station on the St. Lawrence river just west of Cornwall, the Robert Moses (U.S.) and the Robert Saunders (Canadian) consituting one structure across the river and producing equal amounts of energy. Under BOC conditions the mean annual energy production of the Robert Saunders station is 6452 GW.h.

With climatic change and its effects on the hydrological cycle, the potential for hydro electric generation in the Great Lakes would be changed.

influence sur la production d'électricité. La pratique courante aux centrales hydro-électriques du Saint-Laurent consiste à provoquer la formation d'une couverture de glace stable. Avec le réchauffement du temps, le nombre d'années d'englacement sera moindre; toutefois, il pourrait aussi y avoir accroissement de la fréquence des années d'englacement, années au cours desquelles on ne pourra cependant provoquer la formation d'une couverture de glace stable. Dès lors, l'occurrence d'un changement climatique dû à un doublement du CO_2 pourrait nécessiter des modifications aux pratiques en cours aux centrales du Saint-Laurent. L'étude des relations entre ces paramètres déborde le cadre du présent rapport.

RÉPERCUSSIONS SUR LA NAVIGATION MARITIME D'UN CHANGEMENT CLIMATIQUE DÛ A UN DOUBLEMENT DU CO_2

Les navires sont le meilleur moyen de transport de marchandises en vrac sur les Grands Lacs, la plus grande voie navigable du monde qui dessert 17 États et quatre provinces d'Amérique du Nord.

Le modèle socio-économique utilisé durant les recherches dont il est question ici a été élaboré par le Conseil international de régularisation du lac Érié (ILER), qui relève de la Commission mixte internationale. On a fondé cet organisme, en 1977, pour étudier la possibilité de régulariser partiellement les eaux du lac Érié par suite de l'observation de niveaux d'eau record au début des années 70. Depuis la parution du rapport de l'ILER, des chercheurs de l'Institut Sea Grant de l'Université du Wisconsin ont considérablement modifié le modèle eu égard aux différents niveaux d'eau et débits. Dans nos travaux, nous avons utilisé le modèle modifié.

Ce modèle détermine sur une base mensuelle le tirant d'eau acceptable pour les déplacements le long de chacune des voies de transport dans le réseau, en fonction des hauteurs d'eau existantes dans un régime donné de niveaux. Ce tirant d'eau est converti en unités de capacité de chargement qui servent à calculer le nombre de voyages nécessaires au transport des différents types de marchandises. Pour faire ces calculs, il faut connaître la composition de la flotte, les caractéristiques et la vitesse de fonctionnement des navires et d'autres renseignements pertinents sur le réseau. La sortie du modèle donne le nombre de voyages nécessaires au transport d'un type de marchandises donné et, à partir du coût d'exploitation des navires selon les différents tonnages, le coût mensuel de transport de chaque type de marchandises pour le niveau d'eau considéré.

La sortie finale du modèle (figure 3) donne la somme des coûts mensuels, qui correspond au coût annuel d'exploitation de la flotte canadienne de navires transportant les quatre principaux types de marchandises, soit le minerai de fer, les céréales, le charbon et le calcaire qui, collectivement, représentent 85 % des marchandises transportées sur les Grands Lacs. Durant la période de référence considérée dans le scénario 1 (1900 à 1976), le coût annuel moyen de transport de ces quatre types de marchandises était de 197 300 000 $ (dollars U.S. de 1979). Le coût annuel moyen pour chaque type de marchandises est le suivant : 78 800 000 $ pour le minerai de fer; 77 500 000 $ pour les céréales; 31 400 000 pour le charbon et 9 600 000 $

Tableau 3

Coût annuel d'exploitation de la flotte canadienne (en millions de dollars U.S. de 1979)

	Scénario 1 (période de référencede la consommation	Scénario 2 Changement de climat et accroissement	Scénario 3 Changement de climat (de 1900 à 1977) de
Minerai de fer	78.8	84.0	86.6
Céréales	77.7	80.0	75.7
Charbon	31.4	33.2	91.6
Calcaire	9.6	9.7	8.3
Total: Moyene	197.3	206.9	262.2
Maximum([1])	207.1	226.9	262.2
Minimum([2])	193.5	196.8	240.0

([1]) Coût maximal durant la période de 1900 à 1977

([2]) Coût minimal durant la période de 1900 à 1977

pour le calcaire. Durant les 77 années de la période de référence, le coût annuel maximal a été de 207 100 000 $ et le coût annuel minimal de 193 500 000 $. Durant la période de faibles niveaux d'eau, de 1963 à 1965, le coût annuel d'exploitation de la flotte a été de 202 600 000, de 207 100 000 et de 203 200 000 $. Durant huit des 77 années de la période de référence, on a connu des coûts annuels de cet ordre.

Le modèle de l'ILER peut traiter différents scénarios. Par exemple, si l'on ajoute au modèle des changements dans le régime hydrologique des Grands Lacs dus aux conditions climatiques tout en conservant les mêmes quantités transportées, le coût annuel moyen d'exploitation augmente à 206 900 000 $, soit de presque 10 millions de dollars (coût minimal de 196 800 000 $ et coût maximal de 227 000 000 $) à cause de l'augmentation du nombre de voyages. Comme la fréquence d'occurrence des faibles niveaux d'eau augmente, le modèle prévoit que durant 53 années sur 77 (dans 69 % des cas), le coût annuel d'exploitation de la flotte sera similaire à celui observé durant la période difficile de 1963 à 1965.

Pour élaborer le scénario 3 (tableau 3), nous avons ajouté la sortie du modèle, augmenté la consommation d'eau des Grands Lacs, supposé une saison de navigation de onze mois et accru de 2 % les quantités de charbon transportées. Le coût annuel moyen d'exploitation de la flotte a augmenté jusqu'à 262 200 000 $ (coût maximal de 299 600 000 $ et coût minimal de 239 800 000 $) pour la période de 1900 à 1976. Toutefois, un changement plus

important s'est dessiné : la fréquence des années durant lesquelles le coût était égal ou supérieur au coût annuel durant la période de 1963 à 1965 a augmenté jusqu'à 75 des 77 années (97 % du temps).

Le modèle socio-économique, qui établit un rapport entre le niveau de l'eau des lacs et le coût du transport, souffre de nombreuses incertitudes, mais selon la "meilleure estimation" des conditions futures, le scénario du changement climatique dû au doublement du CO_2, l'accroissement de la consommation de l'eau des Grands Lacs et la légère augmentation du transport de charbon feront augmenter de 30 % le coût annuel moyen d'exploitation de la flotte et la fréquence des années où le coût sera égal ou supérieur à celui observé de 1963 à 1965 augmentera considérablement.

RÉPERCUSSIONS SUR LA PRODUCTION HYDRO-ÉLECTRIQUE D'UN CHANGEMENT CLIMATIQUE DU AU DOUBLEMENT DU CO_2

En 1979, la production totale d'énergie d'Ontario Hydro a été de 103 597 gigawattheures (GWh). Environ 40 % de cette énergie provenait de la production hydro-électrique et environ 41 % de cette production résultait de l'utilisation de l'eau des Grands Lacs. C'est la stabilité des débits dans tout le réseau des Grands Lacs qui rend les centrales de cette région si utiles pour la production hydro-électrique. Durant nos travaux, nous avons utilisé les modèles de l'ILER ne tenant compte que des centrales électriques canadiennes du réseau des Grands Lacs, situées sur les rivières St. Mary's et Niagara et le fleuve Saint-Laurent. Là encore, nous avons considéré les scénarios des conditions de la période de référence (1900-1976), du changement de climat et du changement de climat ajouté à l'accroissement de la consommation d'eau.

Selon le scénario de la période de référence, les grandes centrales hydro-électriques des Grands Lacs utilisent le débit résultant de la différence d'élévation entre les lacs d'amont et les lacs d'aval pour produire de l'électricité. La production annuelle moyenne de la centrale hydro-électrique canadienne de la rivière St. Mary's est de 400 GWh, soit 3% de la capacité de production du complexe Sir Adam Beck situé sur la Niagara. C'est à Niagara Falls qu'on trouve la plus forte concentration d'installations hydro-électriques dans le secteur des Grands Lacs. Au Canada, les centrales des chutes DeCew et le complexe Sir Adam Beck produisent la majeure partie de l'énergie. Selon le scénario de la période de référence, la production annuelle moyenne des centrales des chutes DeCew est de 864 GWh et celle du complexe Sir Adam Beck, de 11 789 GWh.

Le Canada et les États-Unis exploitent conjointement une centrale hydro-électrique sur le Saint-Laurent, juste à l'ouest de Cornwall : les deux parties de la centrale (le complexe Robert Moses aux États-Unis et le complexe Robert Saunders au Canada) constituent une seule structure et produisent d'égales quantités d'énergie. En vertu du scénario de la période de référence, la production annuelle moyenne de la centrale Robert Saunders est de 6 452 GWh.

Le changement de climat et ses effets sur le cycle hydrologique modifieraient le potentiel de production hydro-électrique des Grands Lacs. Selon le scénario climatique du doublement du CO_2 et de modification du niveau de l'eau et des débits, le modèle estime que la production annuelle d'énergie de la centrale de la rivière St. Mary's passerait à 410 GWh (augmentation de 2,5 %). Cette augmentation serait due à l'accroissement de la différence d'élévation entre le lac Supérieur et les lacs Michigan et Huron étant donné que le niveau de l'eau dans ces derniers baisserait plus que celui du lac Supérieur.

En ce qui touche les centrales de la rivière Niagara, la baisse anticipée du niveau de l'eau du lac Érié entrainerait une diminution d'environ 18% de la production annuelle moyenne des installations DeCew jusqu'à 709 GWh et d'environ 13 %, jusqu'à 10 260 GWh, de celle de la centrale Sir Adam Beck, si le niveau de l'eau du lac Ontario est maintenu à sa valeur actuelle par le Conseil de régularisation du niveau du lac Ontario. Toutefois, si l'on permet que le niveau moyen de l'eau du lac Ontario baisse de 30 et de 60 cm, la production de la centrale Robert Saunders baisserait respectivement de 2 et de 5 %.

Dans le scénario du changement de climat allié à l'accroissement de la consommation d'eau, le niveau de l'eau des lacs Michigan et Huron baisserait plus que celui du lac Supérieur. Par conséquent, la production de la centrale de la rivière St. Mary's augmenterait légèrement jusqu'à 411 GWh. Pour ce qui est des centrales de la Niagara, l'ajout de l'accroissement de la consommation d'eau réduirait le niveau annuel moyen de l'eau du lac Érié à 173,29 m - ce qui représente une baisse de 68 cm par rapport à celui mesuré durant la période de référence - et le débit sortant du lac Érié de 8%. Ainsi donc, la production annuelle moyenne de la centrale DeCew baisserait à 526 GWh (d'environ 39 %) et la production annuelle de la centrale Sir Adam Beck à 9 190 GWh (de 22 %) dans les conditions observées pendant la période de référence. Nous n'avons pas tenu compte de l'effet de l'accroissement de la consommation d'eau sur la production

des centrales du Saint-Laurent car le modèle ne pouvait simuler des niveaux d'eau et des débits fidèles à la réalité pour le lac Ontario.

INCIDENCES ÉCONOMIQUES D'UN CHANGEMENT DE CLIMAT SUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Les centrales hydro-électriques, qui constituent le moyen le plus économique de produire de l'électricité, sont exploitées au maximum. Toute perte de production hydro-électrique oblige donc à recourir à des méthodes plus coûteuses. En Ontario, la solution de remplacement consisterait à recourir à la fois aux centrales nucléaires et aux centrales alimentées par des combustibles fossiles.

En 1979, Ontario Hydro a dépensé 606 000 000 $ (dollars U.S. de 1979) en combustibles pour l'alimentation de ses centrales nucléaires et de ses centrales alimentées par des combustibles fossiles, qui ont produit 63 200 GWh (60 % de l'énergie totale produite). On a estimé que la production d'électricité au moyen des centrales de ces types a coûté au total 973 millions de dollars en frais d'exploitation, dont 367 millions de dollars aux chapitres de l'exploitation, de la maintenance et de l'administration. En termes économiques, la production d'énergie à partir des centrales nucléaires et des centrales alimentées par des combustibles fossiles coûte environ 15 500 $ par GWh. La perte de production des trois plus grandes centrales du Canada résultant d'un changement de climat serait de 2 220 GWh au total et elle serait de 4 165 GWh si l'on ajoute le facteur de l'accroissement de la consommation d'eau. En conséquence, si Ontario Hydro compensait cette perte de production en ayant recours à des centrales nucléaires et à des centrales alimentées par des combustibles fossiles, elle devrait débourser respectivement 34 400 000 et 64 000 000 $ (dollars U.S. de 1979).

LE CLIMAT ET LA DEMANDE D'ÉNERGIE

La demande d'énergie comprend la demande de base et la demande saisonnière. La première, fondée sur des facteurs non climatiques, est influencée principalement par le nombre de consommateurs et le niveau de l'activité économique. Les variations à long terme de la demande d'énergie sont déterminées en grande partie par l'évolution de ces deux facteurs. Les projections de la consommation d'énergie faites ici sont fondées sur le modèle prévisionnel de 1984 d'Ontario Hydro, qui tient compte de ces facteurs.

Le rapport d'Ontario Hydro sur la demande d'énergie contient des projections jusqu'à l'an 2013. Les principales différences entre la demande d'énergie de 1984 et celle de 2013 sont attribuables à une augmentation annuelle prévue de 2,69 % de 1984 à 1993, de 2,39 % de 1994 à 2003 et de 1,96 % de 2004 à 2013 et à une forte demande d'énergie en été d'ici à l'an 2013. En utilisant la tendance établie dans les prévisions d'Ontario Hydro, nous avons constaté que la consommation d'énergie devrait augmenter de 1,46 % par année de 2014 à 2023 et de 0,86 % par année de 2024 à 2035, année où la demande d'énergie serait de 280 520 GWh.

La demande saisonnière, qui est influencée par les conditions atmosphériques, correspond à la consommation d'électricité pour le chauffage et le refroidissement de l'air. Nombre d'études ont montré qu'il existe un lien étroit entre la demande d'énergie et la température moyenne. La figure 7 montre le rapport entre la demande mensuelle moyenne d'énergie électrique en Ontario et la température mensuelle moyenne mesurée à l'aéroport international de Toronto, en 1984. La température mesurée à cette station est considérée comme représentative de celles du sud de l'Ontario, où Ontario Hydro reçoit la majeure partie de la demande d'énergie. Le rapport demande d'énergie-température a permis de formuler une équation de régression linéaire et et de calculer un coefficient de corrélation de 0,96. On peut attribuer à la température 92 % des variations de la demande d'électricité.

Dans le scénario climatique dû au doublement du CO_2, la température moyenne en Ontario augmenterait de 4,5°C (de 5 à 6°C en hiver). Le rapport demande d'énergie-température mentionné ci-dessus nous a permis de constater que l'accroissement de la température en hiver ferait baisser la demande projetée d'énergie dans une proportion de 6 533 à 7 840 GWh. De même, une hausse de 3 à 4°C de la température en été causerait une augmentation de 162 à 216 GWh de la demande d'énergie. Dès lors, l'effet net du changement climatique dû au doublement du CO_2 serait une diminution annuelle de 2 à 3 % de la demande d'énergie et, donc, une économie de 100 à 118 millions de dollars pour Ontario Hydro. Il convient aussi de remarquer que le changement de climat prévu réduirait la production des centrales électriques du Canada dans le secteur des Grands Lacs, mais qu'il entrainerait également une diminution de la demande d'énergie.

CONCLUSIONS

Au cours de l'étude, nous avons utilisé la sortie de plusieurs modèles informatiques réalisés par des spécialistes appartenant à différentes disciplines. Bien qu'ils souffrent tous de nombreuses incertitudes, ces modèles fournissent actuellement la "meilleure estimation" de l'avenir dans la région des Grands Lacs, tant sur le plan hydrologique que sur le plan économique.

Si le changement de climat prévu dans les scénarios exposés ici se produit, le régime hydrologique des Grands Lacs connaitra d'importantes modifications. Les niveaux et les débits moyens baisseront mais, ce qui est encore plus important, la fréquence d'occurrence de faibles niveaux et débits s'accroîtra, compte tenu de la variabilité naturelle du réseau.

Si le scénario climatique dû au doublement du CO_2 s'avère, tous les lacs du réseau seraient libres de glaces à l'exception du lac Érié qui, à cause de sa faible profondeur et de son faible potentiel d'accumulation de chaleur, aurait une couverture de glace de 50 % en moyenne chaque année (par rapport aux 90 % observés actuellement).

Si l'on considère le scénario de la Commission mixte internationale, qui prévoit l'accroissement de la consommation de l'eau des Grands Lacs d'ici à l'an 2035 ainsi que la diminution de la couverture de glace et le changement climatique, les niveaux et les débits connaîtraient d'autres changements. Les premiers pourraient baisser dans une proportion atteignant 80 cm et les seconds dans une proportion atteignant 20 % et l'on observerait sept années sur dix de faibles niveaux et débits comme ceux mesurés durant les années 30 et 60.

A partir des modèles économiques élaborés par la Commission mixte internationale et modifiés par des scientifiques de l'Université du Wisconsin, on peut convertir les effets sur le régime hydrologique des Grands Lacs du changement prévu en coût d'exploitation de la flotte de navires marchands canadiens dans les Grands Lacs et de production hydro-électrique dans la même région. Le coût annuel moyen d'exploitation de la flotte canadienne augmenterait de 30 % pour le transport des quatre principaux types de marchandises (minerai de fer, céréales, charbon et calcaire) et, plus de neuf ans sur dix, ce coût serait égal ou supérieur à celui observé au milieu des années 60.

Le réchauffement du temps qu'implique le scénario climatique dû au doublement du CO_2 entraînerait une baisse d'environ 2 à 3 % de la demande d'énergie, de sorte qu'Ontario Hydro réaliserait des économies annuelles de 172 000 000 à 204 000 000 $ (dollars de 1984). Comme le régime hydrologique des Grands Lacs serait modifié, la production annuelle moyenne des deux plus grandes centrales de la région (Sir Adam Beck et Robert Saunders) diminuerait d'environ 20 %, ce qui représenterait une dépense annuelle de 111 millions de dollars ($C 1984) si ce manque était comblé par l'utilisation de centrales nucléaires et de centrales alimentées par des combustibles fossiles. Toutefois, Ontario Hydro réaliserait des économies annuelles de 61 à 92 millions de dollars ($C 1984) car cette perte de production serait contrebalancée par la diminution de la demande d'énergie.

REMERCIEMENTS

Les recherches visées par le présent rapport ont été effectuées par l'Institut des Grands Lacs de l'Université de Windsor au titre d'un contrat. L'Institut, qui a un caractère multidisciplinaire, est le seul établissement universitaire du Canada voué à la recherche sur les Grands Lacs. Il a achevé récemment une étude d'une durée de trois ans sur les effets de quatre contaminants toxiques dans la région de Detroit-Lac Sainte-Claire.

L'équipe de recherche se composait des personnes suivantes : Marie Sanderson (coordonnatrice et directrice de l'Institut), Darrell Marchand, David Howe, Cathy Alpaugh, Christine Loeback et Peter Stokoe. Nous adressons des remerciements particuliers à C.F. Southam, du Centre canadien des eaux intérieures, Eric Loucks, de l'Université du Wisconsin, et R. Assel, du Great Lakes Environmental Research Laboratory, à Ann Arbor, qui nous ont apporté aide et conseils concernant les différents modèles.

Liste des figures

Figure 1. Emplacement des sources de données dans le bassin des Grands Lacs considéré par le modèle de changement de climat du GISS

Figure 2. Températures moyennes de janvier
2A - Températures mesurées de 1951 à 1980
2B - Températures prévues d'après le scénario climatique du doublement du CO_2 du GISS

Figure 3. Températures moyennes en juillet
3A - Températures mesurées de 1951 à 1980
3B - Températures prévues d'après le scénario climatique du doublement du CO_2 du GISS

Figure 4. Précipitations moyennes en janvier (en mm)
4A - Précipitations mesurées de 1951 à 1980
4B - Précipitations prévues d'après le scénario climatique du doublement du CO_2 du GISS

Figure 5. Précipitations moyennes en septembre (en mm)
5A - Précipitations mesurées de 1951 à 1980
5B - Précipitations prévues d'après le scénario climatique du doublement du CO_2 du GISS

Figure 6. Niveaux d'eau annuels moyens du lac Érié (1900-1976)

———————————.Base de comparaison

----------.Scénario de changement de climat

———.——.——.———. Scénario de changement de climat et d'accroissement de la consommation d'eau

Figure 7. Rapport entre la température mensuelle moyenne et la demande d'énergie - Toronto (Ontario)

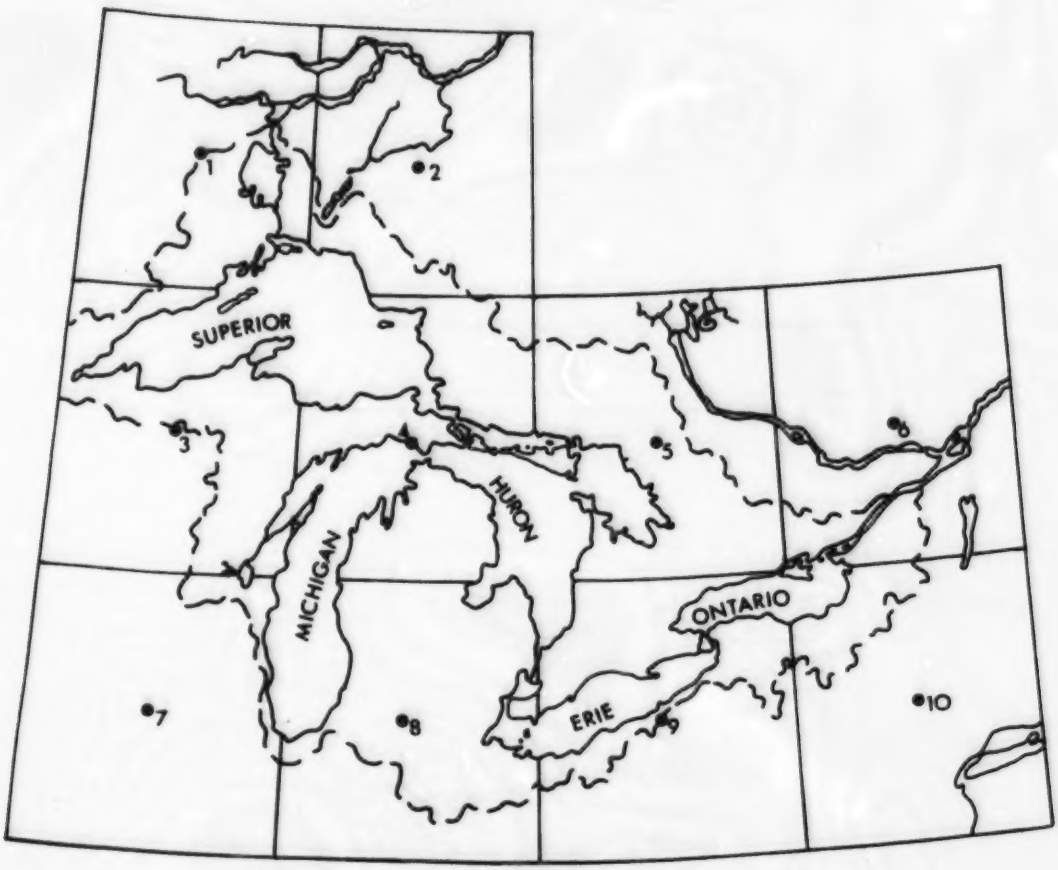
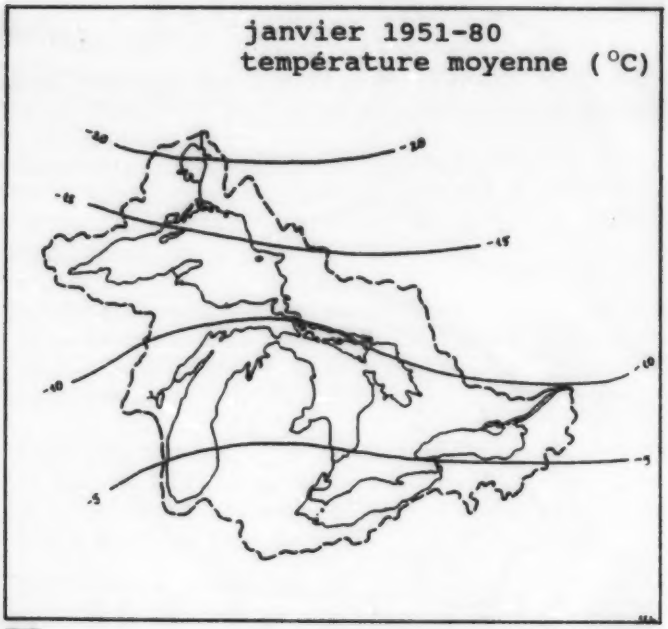
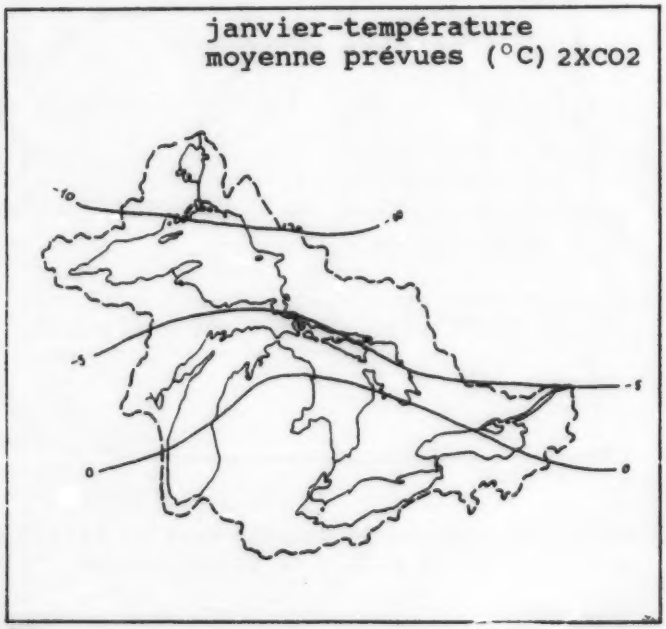


Figure 1. Emplacement des sources de données dans le bassin des Grands Lacs considéré par le modèle de changement de climat du GISS



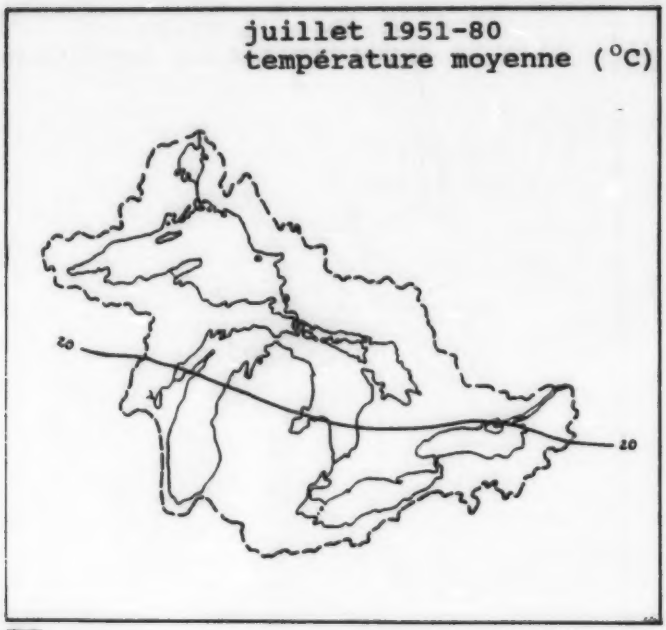
2A



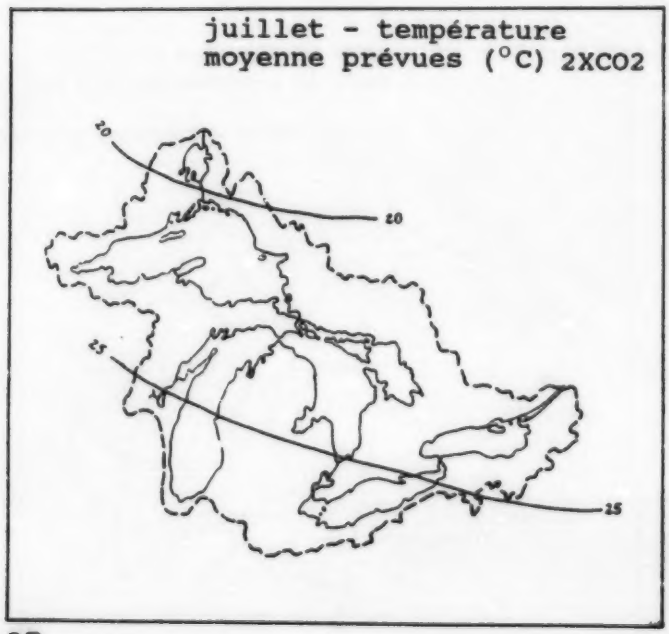
2B

Figure 2.

Températures moyennes de janvier
2A - Températures mesurées de 1951 à 1980
2B - Températures prévues d'après le scénario climatique du doublement du CO_2 du GISS

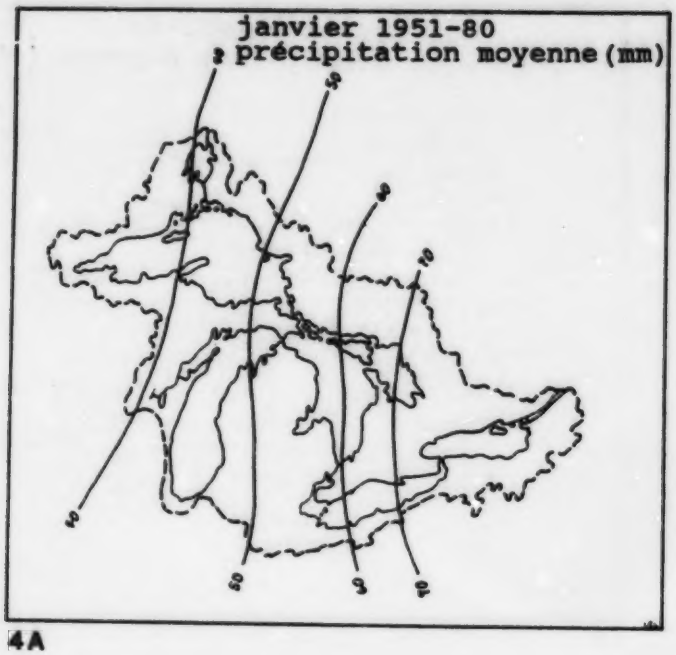


3A

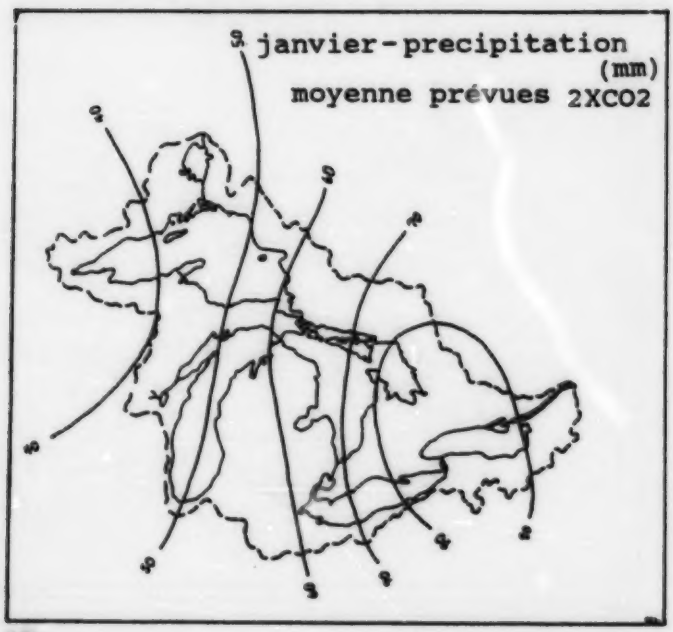


3B

Figure 3.
Températures moyennes en juillet
3A - Températures mesurées de 1951 à 1980
3B - Températures prévues d'après le scénario climatique du doublement du CO_2 du GISS



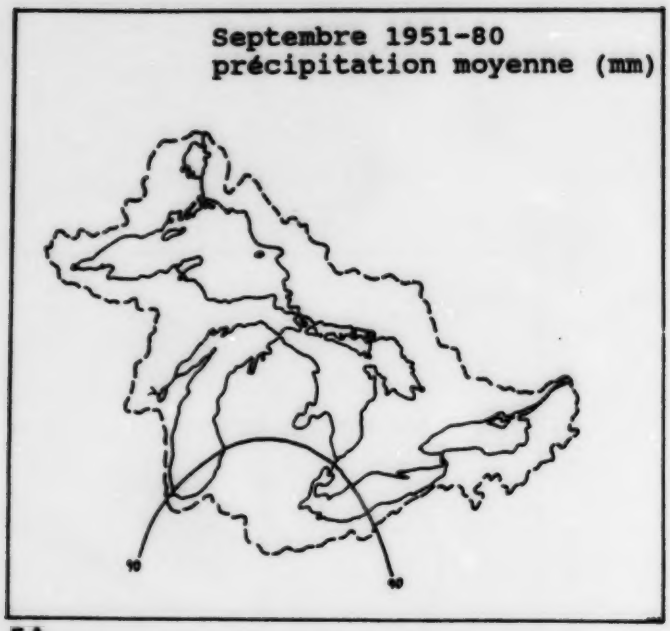
4A



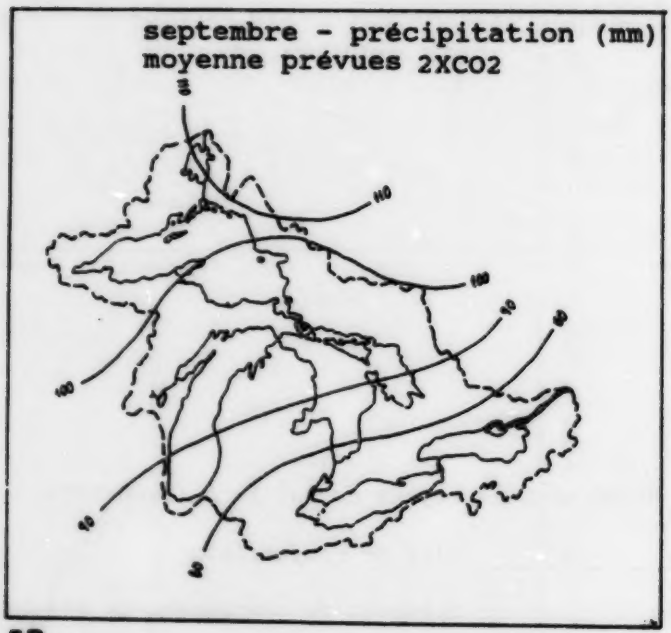
4B

Figure 4.

Précipitations moyennes en janvier (en mm)
4A - Précipitations mesurées de 1951 à 1980
4B - Précipitations prévues d'après le scénario climatique du doublement du CO_2 du GISS



5A



5B

Figure 5.

Précipitations moyennes en septembre (en mm)
5A - Précipitations mesurées de 1951 à 1980
5B - Précipitations prévues d'après le scénario climatique du doublement du CO_2 du GISS

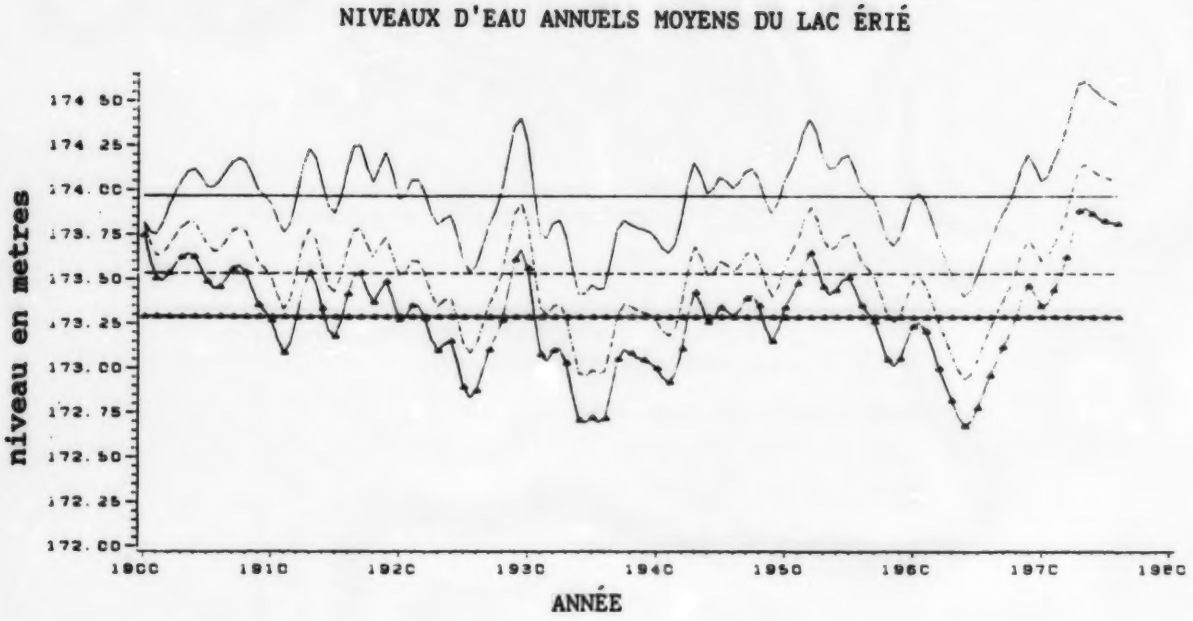


Figure 6.

Niveaux d'eau annuels moyens du lac Érié (1900-1976)

_____ Base de comparaison

---------- Scénario de changement de climat

▲____ ▲ ____ ▲ ____ Scénario de changement de climat et d'accroissement de la consommation d'eau

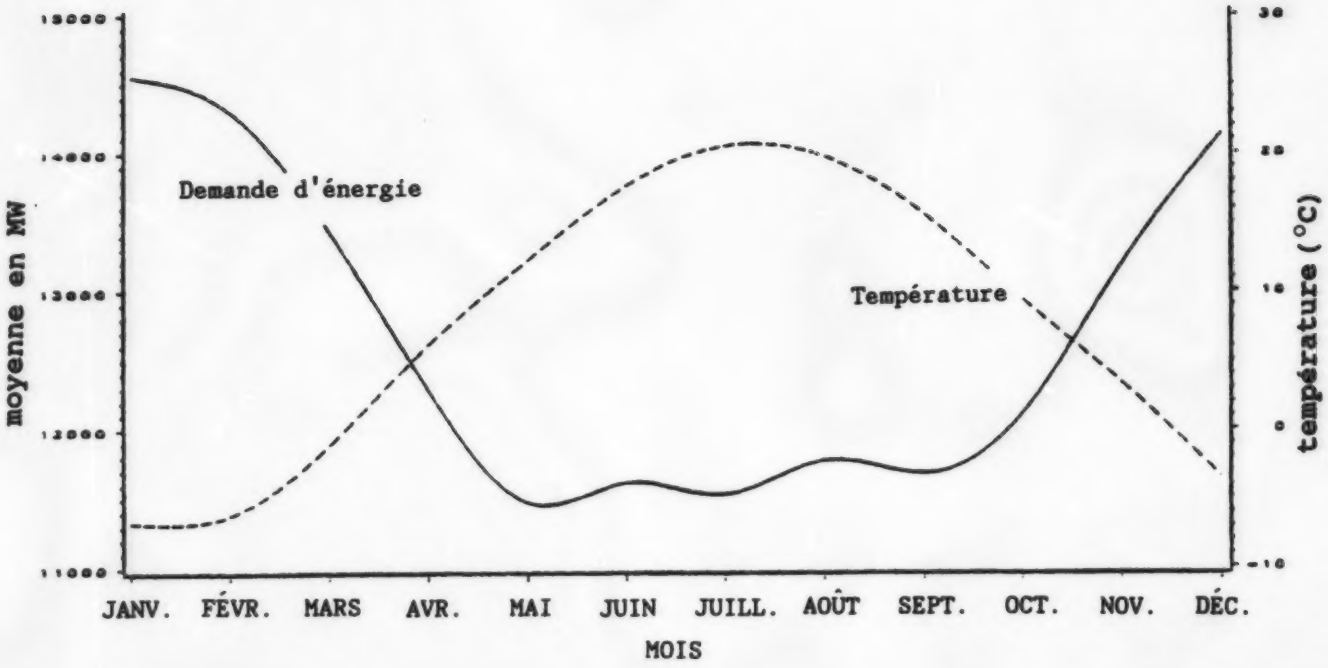


Figure 7. Rapport entre la température mensuelle moyenne et la demande d'énergie - Toronto (Ontario)